

Université de Montpellier II

Ecole Doctorale « Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie,
Géosciences, Hydrosciences et Environnement »

Mémoire présenté en vue d'obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

De l'écophysiologie à l'agroécologie,
contribution aux recherches sur les systèmes de culture



Eric Malézieux

-Tome 1 -



« Comme nature nous donne infinies espèces de fruits, aussi c'est par diverses sortes de culture,
que nous les tirons de la terre....

Il appert [] que la science de l'Agriculture est comme l'ame de l'expérience. Elle ne peut estre
oisive pour estre recogneuse vraiment science : car de quoi serviroit d'escire et lire les livres
d'agriculture, sans les mettre en usage ? La science ici sans usage ne sert à rien ; et l'usage ne
peut estre assuré sans science. »

(Olivier de Serres. Le Théâtre d'agriculture et Mesnage des champs, 1600)

« On ne commande à la nature qu'en lui obéissant"
(Bacon, Novum Organum, 1620).

"Man cannot influence nature, or convert its forces to
his own use, unless he understands the natural laws
according to their relations of measure and numbers. "

Alexandre von Humboldt (1769-1859).

Remerciements

Ma gratitude va en premier lieu à ceux qui m'ont donné le goût de la recherche, celui d'une recherche en agronomie sur les systèmes de culture. Derrière Michel Sebillotte, c'est toute l'équipe d'enseignants de la Chaire d'Agronomie de l'INA-PG des années 80 que je remercie—ils se reconnaîtront—qui, en quelques années, ont su insuffler aux étudiants que nous étions les bases scientifiques et surtout l'envie d'un engagement dans la recherche dont le sens perdure aujourd'hui.

S'engager dans la rédaction d'une HDR ne constituait pas il y a quelques années une démarche naturelle pour un agronome du Cirad. Plusieurs personnes ont su m'insuffler le courage de m'atteler à cette tâche. Jean-Joseph Lacoeylle d'abord et très tôt. Je le remercie ici pour son appui dans les premières années de ma carrière et pour ses encouragements par la suite pour « m'y mettre ». Hubert Manichon et Michel Dron ont joué aussi un rôle déterminant, par la confiance qu'ils m'ont accordée à des moments décisifs, et par leurs encouragements et leurs conseils aussi avisés qu'amicaux, de professeurs et d'amis.

La concrétisation d'un travail d'HDR requiert un soutien académique et institutionnel, autant que scientifique. Jacques Wery a soutenu activement ce projet et a accepté d'en assurer la responsabilité, il a aussi contribué significativement à l'élaboration de ce manuscrit, par ses lectures critiques aussi approfondies qu'avisées.

Le travail présenté ici est pour beaucoup un travail collectif. Il est pour partie le fruit d'encadrements de travaux de recherche d'étudiants, et particulièrement les thésards que j'ai eu le plaisir de diriger, qui ont produit résultats et contribué à faire germer idées et hypothèses. Je remercie en premier lieu Alexandra Jullien, Philippe Tixier et Nathalie Lamanda pour ces fécondes avancées ensemble (et ces inoubliables séjours en Guadeloupe et au Vanuatu !). Ce fût et c'est toujours un plaisir de travailler avec eux.

Les idées développées dans ce mémoire doivent beaucoup aux nombreux échanges avec les collègues, ceux de l'équipe bien sûr, mais aussi ceux des autres équipes de l'Unité, du Cirad et de l'INRA. C'est une vision collective, forgée au cours de plusieurs années, qui est présentée ici. Merci aussi à Sandrine Renoir, qui a contribué à la mise en forme de ce mémoire.

J'exprime bien sûr ma profonde gratitude envers tous les membres du jury qui ont accepté, malgré leur emploi du temps fort chargé, d'évaluer le contenu de ce dossier et de me faire profiter de leurs remarques pour l'avenir.

Un dernier mot pour Sylvie, Astrid, Anaïs et Vianney, qui m'ont supporté plus que de raison quand ce travail occupait par trop mes esprits !

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	- 1 -
CURRICULUM VITAE	- 5 -
LISTE DES ABREVIATIONS	- 7 -
PREAMBULE	- 8 -
POURQUOI PASSER UNE HDR ?	- 8 -

PREMIERE PARTIE : Itinéraire professionnel

I. LE METIER DE CHERCHEUR.....	- 11 -
I.1. UNE FORMATION AGRONOMIQUE ET UNE PREMIERE EXPERIENCE OUTREMER (1981-1986).....	- 11 -
I.2. LA RECHERCHE EN COOPERATION, EN COTE D'IVOIRE (1986-1992)	- 12 -
I.3. LE POST-DOCTORAT DANS UNE UNIVERSITE AMERICAINE : UNE PARENTHESE ENRICHISSANTE ET FORMATRICE (1992-1993).....	- 13 -
II. LE METIER D'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET DE GESTION DE LA RECHERCHE.....	- 13 -
II.1. DES RESPONSABILITES OPERATIONNELLES DE DIRECTION EN TANT QUE CHEF DU PROGRAMME ANANAS ET DIVERSIFICATION FRUITIERE (1993-1996).....	- 13 -
II.2. UNE FONCTION D'ANIMATION SCIENTIFIQUE, DE COORDINATION ET DE PROSPECTIVE AU SEIN DE LA DIRECTION SCIENTIFIQUE DU CIRAD (1997- 2004).....	- 15 -
II.2.1. Concevoir et mettre en œuvre un dispositif d'animation scientifique à l'échelle de l'organisme.....	- 16 -
II.2.2. Rapprochement avec l'INRA et construction des UMR.....	- 17 -
II.2.3. Les Conseils Scientifiques de la délégation : un outil de politique scientifique.....	- 18 -
II.2.4. Participation aux politiques et actions de recrutement et d'évaluation des organismes de recherche	- 19 -
II.2.5. Contribuer au positionnement stratégique du Cirad sur les grandes questions scientifiques	- 20 -
III. LE METIER DE DIRECTION DE RECHERCHE	- 21 -
III.1. L'ENCADREMENT DE THESES	- 21 -
III.2. LA DIRECTION D'EQUIPE	- 22 -
III.2.1. La genèse de l'UMR SYSTEM (1999-...)	- 22 -
III.2.2. L'animation et la direction d'équipe	- 24 -
III.3. L'ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT	- 25 -
IV. CONCLUSION.....	- 25 -

DEUXIEME PARTIE : Mémoire de travaux scientifiques

INTRODUCTION.....	- 27 -
I. COMPRENDRE ET MODELISER LE FONCTIONNEMENT DES PEUPELEMENTS VEGETAUX. APPLICATION A DEUX MONOCOTYLEDONES TROPICALES HERBACEES SEMI- PERENNES : L'ANANAS ET LE BANANIER	- 28 -
I.1. LA CROISSANCE ET L'ELABORATION DU RENDEMENT CHEZ L'ANANAS (ANANAS COMOSUS L. MERR)	- 28 -

I.2. DEVELOPPEMENT ET FORMATION DU FRUIT CHEZ LE BANANIER (MUSA SPP. AAA GRANDE NAINÉ).....	- 31 -
II. ANALYSER, REPRESENTER ET MODELISER LE CHAMP CULTIVE CONSIDERE COMME UN SYSTEME HETEROGENE	- 33 -
II.1. MODELISER UN PEUPLEMENT HETEROGENE DE BANANIER.....	- 33 -
II.2. CARACTERISER L'HETEROGENEITE INTRAPEUPLEMENT CHEZ LE COCOTIER (COCOS NUCIFERA L.).....	- 34 -
II.2.1. L'évolution moyenne du rayonnement transmis par le couvert en plantations paysannes....	- 35 -
II.2.2. La répartition intra-parcellaire du rayonnement transmis au cours du développement des cocotiers.....	- 35 -
II.2.3. La colonisation de l'interligne par les racines primaires (RI) de cocotiers	- 36 -
II.2.4. L'évaluation des états du milieu sous cocotiers et le rôle des modèles : Conclusion	- 37 -
II.3. CONCLUSION.....	- 38 -
III. EVALUER ET CONCEVOIR DES SYSTEMES DE CULTURE DURABLES.....	- 38 -
III.1. L'EVOLUTION DU CONTEXTE SCIENTIFIQUE	- 38 -
III.2. DE NOUVEAUX OUTILS DE MODELISATION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE DURABLES : LE CAS DES SYSTEMES BANANIER AUX ANTILLES.....	- 40 -
III.2.1. Introduction	- 40 -
III.2.2. Le modèle SIMBA.....	- 41 -
III.3. EVALUER DES SYSTEMES COMPLEXES : PREMIERS TRAVAUX D'ANALYSE DES SYSTEMES AGROFORESTIERS EN ZONE TROPICALE HUMIDE	- 45 -
III.3.1. Introduction	- 45 -
III.3.2. L'Evaluation des systèmes agroforestiers	- 47 -
III.4. LA PRISE EN COMPTE DES GRANDS ENJEUX PLANETAIRES	- 49 -
III.4.1. Adapter les systèmes de culture de demain au changement climatique	- 50 -
III.4.2. Biodiversité et agrosystèmes.....	- 54 -
V. CONCLUSION.....	- 55 -

TROISIEME PARTIE : Projet de recherche

PREAMBULE	- 58 -
I. UN PROJET DE RECHERCHE INTEGRE DANS LE PROJET SCIENTIFIQUE DE L'UMR SYSTEM	- 58 -
II. VERS UNE AGRONOMIE DES SYSTEMES DE CULTURE PLURISPECIFIQUES, APPLIQUEE AUX SYSTEMES AGROFORESTIERS COMPLEXES	- 60 -
II.1. INTRODUCTION	- 60 -
II. 2. CONTEXTE, OBJECTIFS ET BASES SCIENTIFIQUES.....	- 61 -
II.2.1. Des agricultures dans l'impasse.....	- 61 -
II.2.2. Questionnements et interactions entre les disciplines de l'agronomie et de l'écologie.....	- 63 -
II.2.3. Du modèle conceptuel de la forêt au système de culture agroforestier	- 65 -
II.3. LES CONCEPTS DE L'ECOLOGIE SONT-ILS OPERATOIRES POUR ANALYSER, EVALUER ET CONCEVOIR DES AGROSYSTEMES ?	- 68 -
II.3.1. Production, stabilité, résilience des agrosystèmes.....	- 68 -
II.3.2. Les enjeux et les rôles de la biodiversité dans les écosystèmes	- 71 -
II.3.3. Caractériser la biodiversité : les traits et groupes fonctionnels	- 73 -
II.4. FAUT-IL REVISITER LE CONCEPT DE SYSTEME DE CULTURE ?	- 77 -
II.5. DE NOUVEAUX OUTILS DE MODELISATION	- 80 -
II.6. DU CHAMP CULTIVE AU PAYSAGE, LA PROBLEMATIQUE DU CHANGEMENT D'ECHELLE.....	- 83 -
II.7. SYSTEMES, TERRAINS ET PARTENARIATS	- 85 -
II.8. CONCLUSION.....	- 86 -
III. CONCLUSION GENERALE.....	- 88 -
RÉFÉRENCES.....	- 90 -

QUATRIEME PARTIE : Annexes

PARTICIPATION A L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET UNIVERSITAIRE.....- 100 -

PARTICIPATION A DES INSTANCES SCIENTIFIQUES- 106 -

LISTE DE PUBLICATIONS.....- 110 -

Curriculum Vitae



Eric MALEZIEUX

Nationalité :	Française
Date et lieu de naissance :	16 mai 1960 à Roubaix (Nord)
Situation familiale :	Marié, 3 enfants
Adresse professionnelle :	SUPAGRO – Bât. 27 2 place Viala - 34060 Montpellier - France tel : 33(0)4 99 61 30 53 fax : 33(0)4 99 61 30 34 Adresse électronique : eric.malezieux@cirad.fr
Profession :	Chercheur, Ingénieur agronome, docteur en agronomie
Fonction actuelle :	Directeur adjoint de l'UMR SYSTEM (Unité Mixte de Recherches Fonctionnement et conduite des SYStèmes de culture Tropicaux Et Méditerranéens)
Organisme :	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) Département PERSYST
Compétences :	Recherche en agronomie et écophysiologie, appliquée aux systèmes de culture tropicaux Animation scientifique, direction et coordination des recherches dans le domaine de l'Agronomie, la gestion de l'environnement et des ressources naturelles.
Autre(s) expertise(s) :	Formation : Enseignement universitaire dans le domaine de compétence (niveau DEA, DAA, master) Expertise scientifique Participation à Comités scientifiques, Commissions d'évaluation, relecture d'articles scientifiques, organisation scientifique de séminaires, congrès, conférences, participation à des jurys de thèse, DEA, DAA, et masters,..) Expertise technologique et technique Etudes de faisabilité de projets de développement ou recherche-développement dans le domaine des filières horticoles tropicales.
Région(s) d'expérience :	Afrique de l'Ouest, Amérique centrale, Antilles, Pacifique Nombreuses missions en régions tropicales
Formation :	Docteur en sciences. Thèse intitulée : Croissance et élaboration du rendement de l'ananas. Ananas comosus (L.) Merr. INA-PG (1988) Ingénieur agronome / diplôme d'Agronomie Approfondie Institut National Agronomique, Paris-Grignon (1984) Admissible à l'Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm (1981)
Compétences linguistiques :	Langue maternelle : Français Langue de travail : Anglais

Expérience professionnelle :

Depuis septembre 2004 : directeur adjoint de l'UMR SYSTEM

Cirad, Montpellier (France)

Animateur de l'axe 2 de l'Unité

Responsable de l'Equipe PERSAFT (Performances des systèmes agroforestiers tropicaux)

Chargé de l'animation de la discipline Agronomie au Cirad

1997 – 2004 : CIRAD, Direction Scientifique

Délégué scientifique Agronomie et Ecologie (AGER)

Cirad, Montpellier, France

Chargé de l'animation et de la coordination scientifique dans le domaine de l'Agronomie, de la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au CIRAD (300 cadres dans la délégation), sous la direction du Directeur Scientifique du Cirad

- Animation scientifique du champ disciplinaire
- Ouverture prospective du champ disciplinaire
- Relations avec les instituts de recherche du Nord (INRA, IRD, CNRS, Universités). En particulier mise en place des UMR, rapprochements INRA-CIRAD
- Participation à la définition, la mise en place et le suivi d'actions incitatives (ATP, AIP, AIC, divers appels d'offre)
- Appui à la formation scientifique des agents
- Participation aux jurys de recrutement et à la définition des profils de recrutement
- Organisation des activités du Comité Scientifique Ager

1993-1996 : CIRAD-FLHOR (Département Fruits, Légumes et Horticulture)

Montpellier (France)

Chef du Programme Ananas et Diversification Fruitière

Responsable de la conception et de la mise en oeuvre des activités de recherche, de développement et de formation au sein du Programme. Missions dans de nombreux pays étrangers (Ghana, Cameroun, Côte d'Ivoire, Bénin, Bolivie, Colombie, Brésil, Vietnam, Thaïlande...) et dans les DOM (Martinique, Guadeloupe, Réunion)

1992-1993 : University of Hawaii

Post-doctorat dans le laboratoire du Dr. D.P. Bartholomew. Department of agronomy and soil science. College of Tropical Agriculture. University of Hawaii.

Recherches sur la physiologie du peuplement et la modélisation chez l'ananas. Elaboration d'un modèle de simulation de la croissance et du développement de l'ananas (ALOHA-PINEAPPLE)

1986-1992 : CIRAD-IRFA

Abidjan (Côte d'Ivoire)

Chercheur

Recherches dans le cadre du Programme Ananas (écophysiologie, mise au point d'itinéraires techniques, modélisation de la croissance et prévision du rendement). Appui au développement de la filière en Côte d'Ivoire

1984-1985 : CIRAD-IRFA

Abidjan (Côte d'Ivoire) Service National dans le cadre de la Coopération

Ingénieur de recherches dans le cadre du programme Ananas (agronomie, système de culture)

Liste des abréviations

AGER	Agronomie, Gestion de l'Environnement et des Ressources naturelles
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ATP	Action Thématique Programmée
CIRAD	Centre de Coopération Internationale de Recherche pour le développement
CP	Cultures Pérennes (Département du Cirad)
CSS	Commission Scientifique Spécialisée (INRA)
DAA	Diplôme d'Agronomie Approfondie
DOM	Département d'Outremer
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfert
ENSAM	Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
ESA	European Society for Agronomy
FLHOR	Fruits, Légumes et Horticulture (département du CIRAD)
HDR	Habilitation à Diriger des Recherches
IBSNAT	International Benchmark System Network for Agrotechnology Transfer
INA-PG	Institut National agronomique Paris-Grignon
INH	Institut National d'Horticulture
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
IPGRI	International Plant Genetic Ressources Institute
IRFA	Institut de Recherches sur les Fruits et Agrumes
ISHS	International Society for Horticultural Science
PERSYST	Performances des systèmes de production tropicaux (département du Cirad)
UH	University of Hawaii
UMR	Unité Mixte de Recherche

Préambule

Pourquoi passer une HDR ?

Ma mission au Cirad, organisme au sein duquel je travaille depuis 1984, m'a conduit à exercer un ensemble de responsabilités diversifiées et à conduire de nombreuses actions de recherche, d'encadrement, d'enseignement, d'expertise au service d'un mandat, celui du développement rural des régions chaudes. Ces différentes activités, qui constituent autant de facettes du métier de chercheur au Cirad, s'interpénètrent et se répondent souvent, mais se concurrencent aussi, tant la pression quotidienne, la recherche de l'excellence aussi, exigent des choix.

Le Cirad, Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial, a connu de fortes évolutions depuis 1984, date du début de ma carrière professionnelle. Au milieu des années 80, le Cirad, à peine créé à partir d'une collection d'instituts techniques issus de la période de la colonisation commence sa mutation. Celle-ci n'aura de cesse de se poursuivre et continue encore aujourd'hui, vers la constitution d'une véritable institution de recherche, intégrant les tensions liées aux exigences souvent contradictoires de la production de connaissances et de l'action pour le développement. Issus de l'appui technique aux grandes plantations agro-industrielles coloniales de cultures tropicales comme le palmier à huile, l'hévéa, le bananier, l'ananas, etc., les instituts de recherche qui composent le Cirad à son origine deviendront des départements, qui évolueront à leur tour fortement, prenant progressivement en compte les nouveaux enjeux locaux et globaux qui caractérisent l'avenir des pays du Sud ainsi que les exigences de la recherche internationale. Nouvelles postures, nouveaux paradigmes, nouvelles méthodes, ces évolutions impliquent de profondes transformations et une évolution de nos métiers. Aujourd'hui, la place du Cirad dans le concert de la communauté scientifique nationale et internationale passe par la reconnaissance de ses chercheurs, y compris à travers leur capacité à diriger des recherches.

Ma démarche est donc pour partie le fruit d'une histoire et d'une mutation collective, pour une reconnaissance et légitimation de l'institution mais aussi et surtout pour une meilleure efficacité de notre dispositif de recherche et d'enseignement. Le besoin est en effet aujourd'hui évident d'une meilleure intégration des actions de recherche et d'enseignement dans et entre nos institutions. La capacité d'un organisme de recherche à disposer d'agents habilités à diriger des recherches constitue assurément l'un des éléments qui contribue à cette intégration. A ce rôle d'enseignement et de formation au sein de nos organisations du Nord s'ajoute celui, complémentaire et inscrit dans le mandat du Cirad, de formation vis à vis de nos partenaires du Sud. La formation des scientifiques des pays du Sud est certainement l'un des enjeux les plus importants et peut-être le plus difficile et le plus délaissé aujourd'hui de notre mandat.

Ma démarche est également personnelle, pour une meilleure intégration dans la communauté des chercheurs, et une reconnaissance plus lisible dans un organisme ou l'habilitation à diriger des recherches n'est pas validée dans le statut. Après avoir exercé des fonctions de recherche et d'encadrement à différents niveaux hiérarchiques dans l'institution Cirad, l'Habilitation à Diriger des Recherches constitue aussi un moyen de confirmer et d'assurer une reconnaissance externe à ces compétences.

Agronome de formation, je n'ai eu de cesse au cours de mon activité professionnelle de mobiliser les compétences scientifiques acquises lors de ma formation initiale au sein de l'équipe d'agronomie de l'INA-PG alors dirigée par le professeur Sébillotte. Je n'ai aussi jamais cessé je

crois de tenter de contribuer à enrichir la discipline, obligeant à maintes remises en question. Ces deux aspects, qui se sont entretenus l'un l'autre sur les différents terrains où j'ai eu à intervenir et à travers les différentes fonctions que j'ai eu à exercer, me permettent de proposer aujourd'hui un certain nombre d'acquis, de réflexions et de questionnements que j'ai tenté de retranscrire ici. Le premier tome de ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches comprendra dans une première partie un rappel de mon parcours professionnel, retraçant l'itinéraire de recherche d'un agronome engagé dans les problématiques actuelles des agricultures du Sud et confronté autant à l'exigence scientifique qu'à la demande du développement, dans ses tâches de recherche comme d'encadrement. Une seconde partie sera constituée d'une synthèse des travaux scientifiques menés depuis 1984 sur différents terrains, directement ou via l'encadrement de jeunes doctorants et chercheurs. Elle précèdera la proposition d'un projet scientifique issu de cette expérience, proposé dans le cadre de l'UMR SYSTEM¹. Cette réflexion, développée dans une troisième partie, est fortement marquée par les questionnements que traverse aujourd'hui l'agronomie, et en particulier par ses changements de paradigme. Elle tente d'explorer les rapports et interactions de cette discipline avec l'écologie, autre discipline de synthèse. Un second tome rassemble un échantillon significatif de publications réalisées.

¹ UMR Fonctionnement et conduite des systèmes de culture Tropicaux et Méditerranéens

PREMIERE PARTIE

Itinéraire professionnel

Un itinéraire professionnel dédié à la recherche en agronomie, pour le développement des régions chaudes

Trois métiers différents mais complémentaires me semblent avoir principalement et successivement structuré mon activité professionnelle depuis mon entrée au Cirad en 1984. Cette première partie déclinera, selon un ordre somme toute chronologique, les métiers de chercheur, d'animation scientifique et de gestion de la recherche, et, enfin, de direction de recherche que j'ai pratiqué jusqu'à aujourd'hui.

I. Le métier de chercheur

I.1. Une formation agronomique et une première expérience outremer (1981-1986)

En 1981, après des études en classes préparatoires Mathématiques Supérieures et Spéciales-Biologie au lycée Saint-Louis à Paris, j'intègre à l'issue des concours nationaux l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA). Après avoir sélectionné et suivi en deuxième année plusieurs unités de valeur me permettant d'appréhender différentes disciplines et approches, c'est sans hésitation que j'opte en troisième année de formation pour la spécialisation Productions Végétales, alors dirigée par le Professeur Michel Sébillotte dans le cadre de la Chaire d'Agronomie. C'est d'abord la perspective et la volonté de pratiquer dans ma future vie professionnelle une recherche tournée vers une « agronomie systémique » qui me conduisent à faire ce choix, tant est privilégiée alors la « formation par la recherche » dans ce cursus. Attiré par les agricultures du Sud et par les défis auxquels elles sont confrontées, je choisis d'effectuer mon stage de fin d'études en Côte d'Ivoire au sein de l'Institut de Recherche sur les Fruits et Agrumes (IRFA)², dans le laboratoire d'agronomie dirigé par Jean-Joseph Lacoeyllhe. A l'issue de ce stage décisif, jeune ingénieur agronome diplômé, je suis tenté par les enjeux personnels et professionnels d'une carrière dédiée à la recherche agronomique outremer. L'occasion m'est donnée de conforter cette orientation, d'abord en qualité de Volontaire du Service National. Affecté en Côte d'Ivoire en 1984, dans la continuité de mon stage de fin d'études, j'ai l'occasion de me consacrer à une première expérience de recherche en coopération dans un poste où recherche et appui technique à la filière restent très imbriqués. J'étudie alors conjointement les systèmes de culture à base d'ananas en plantations paysannes et dans les grandes exploitations pratiquant la monoculture. Mon travail de recherche consiste dans un premier temps à caractériser les différents types d'exploitations productrices d'ananas présentes en Basse Côte d'Ivoire. Les facteurs limitants d'ordre technique et socio-économique au développement de la production et à sa qualité sont identifiés à la fois chez les petits producteurs de l'Est de la Côte d'Ivoire (région de l'Est-Comoë) et dans les grandes exploitations exportatrices de la région d'Abidjan (C6, T1)³. Les conditions nécessaires à l'adaptation des itinéraires techniques des petits producteurs d'ananas de conserve en vue d'une réorientation vers la production d'ananas frais sont alors étudiées. Il était alors important, outre de participer à la mise au point de techniques de production performantes et durables pour différents types d'exploitations, d'identifier les facteurs limitant la production et la qualité des fruits dans le

² qui deviendra plus tard le département Fihor du Cirad

³ Les lettres et numéros renvoient à la **liste de publications** jointe, le radical indiquant le type de publication: publications scientifiques internationales (A), nationales (AN), chapitres d'ouvrages scientifiques (B), thèses et mémoires diplômants (T), ouvrages édités (E), articles à caractère technique ou vulgarisation (P), conférences et communications dans les congrès (C), rapports de projets scientifiques (S), documents à diffusion restreinte dans le domaine de l'animation scientifique ou l'expertise (R). On a inscrit en **gras** les références présentées in extenso dans le tome 4 de ce mémoire.

contexte agronomique et social des petits paysans producteurs d'ananas et leur importance économique dans la filière.

I.2. La recherche en coopération, en Côte d'Ivoire (1986-1992)

En février 1986, à l'issue de mon Service National, je suis recruté au Cirad, et affecté, dans la continuité, au Département IRFA, en Côte d'Ivoire. Je rejoins ainsi mes collègues de la station de l'Anguédédou, au titre de chercheur cette fois. C'est l'occasion de définir de nouveaux axes de recherche qui vont désormais s'orienter, jusqu'en 1992, autour de l'analyse du fonctionnement du peuplement végétal dans la perspective d'une meilleure maîtrise de la productivité et de la qualité. Après une première expérience à l'échelle de l'exploitation agricole, c'est donc ensuite surtout aux échelles de la plante, du peuplement végétal, du champ cultivé, que porteront l'essentiel de mes recherches (C1, C2, C3, C4, C5, R2). Les relations climat-sol-plante-techniques sont abordées, certaines sont modélisées, et débouchent sur la définition de stratégies en matière d'itinéraires techniques. Ma thèse de doctorat, intitulée "Croissance et élaboration du rendement de l'ananas" est réalisée sous la direction de Michel Sébillotte. Elle est soutenue en décembre 1988 à l'INA-PG à Paris et rend compte de ces travaux (T2). Ce travail fournit des bases d'analyse des réactions du peuplement végétal au climat et à différentes techniques culturales. En particulier, les relations entre les processus de croissance et l'élaboration du rendement de l'ananas sont analysées (C7). Les rôles joués par différents facteurs tels que le niveau de croissance atteint au moment de l'induction florale (C8), la compétition intraspécifique (C8, C9) ou la variabilité climatique (C10) sur ces relations sont notamment précisés. L'influence des facteurs de l'environnement est particulièrement étudiée (AN1, AN2, AN3, AN4, C20) et les résultats obtenus permettent d'envisager de premières tentatives de modélisation (AN5, C1, C13, C17). Parallèlement, des innovations concernant certaines pratiques sont proposées : l'utilisation d'herbicides, les techniques de gestion de l'eau (utilisation de mulchs, de polyéthylène, irrigation), le choix de la densité de plantation et la gestion de la fertilisation constituent les principaux thèmes d'étude (R1, R6, R8, R10, R11).

Parallèlement au développement de l'informatique durant cette période, la mise au point de différents outils informatiques est également entreprise avec pour objectif la rationalisation de la gestion des plantations (R2), le diagnostic au champ par système expert (C18) ou l'aide à la décision pour la conduite des cultures (C29).

Durant toute cette période, de 1984 à mars 1992, mes activités se répartissent entre la recherche d'une part et l'appui technique à la profession et à la filière d'autre part. Cet appui se matérialise sous la forme de fréquentes visites techniques chez les producteurs, de la réalisation d'expertises, ou d'études de faisabilité de projets de développement de plantations commandités par des organismes externes (C11, R3, R4, R7, R12, R13), de rapports sur l'organisation de la profession ou les caractéristiques de la production (C12, C16, R5), de participation à des séminaires de formation ou à des journées d'animation destinées aux producteurs. Des expertises techniques en relation avec la filière ananas ouest et centre africain sont également réalisées au Nigéria (R4), au Ghana, au Togo et en Guinée. Cette double implication dans le monde de la recherche et dans celui du développement, malgré les difficultés qu'elle peut engendrer, m'a permis i) de fonder le choix des thématiques scientifiques abordées sur une connaissance approfondie des besoins de la filière et des producteurs, ii) de pouvoir proposer aux producteurs des applications immédiates des recherches réalisées.

I.3. Le post-doctorat dans une université américaine : une parenthèse enrichissante et formatrice (1992-1993)

Début 1992, l'évolution des conditions en Côte d'Ivoire, ma désormais longue expérience dans ce pays et la volonté de renouveler la problématique scientifique que je menais me conduisent à rechercher un séjour de post-doctorat au sein d'une équipe scientifique internationale reconnue. La collaboration recherchée se concrétise en mai 1992 puisque nous décidons avec l'équipe dirigée par le professeur D.P. Bartholomew à l'Université d'Hawaii (USA) d'associer nos compétences pour mener à bien des travaux sur la **modélisation de la croissance et du développement de l'ananas**. Durant un an, la mise en commun de nos efforts nous conduit à développer, au sein du département d'Agronomie et de Science du sol de l'Université d'Hawaii, un modèle de simulation de la croissance et du développement de l'ananas. Ces travaux font l'objet de plusieurs publications (A1, C19, C29) ainsi que d'une synthèse très complète sur la physiologie de l'ananas en réponse aux facteurs de l'environnement (B1). Des collaborations avec le réseau IBSNAT sont tissées dans ce cadre. Cette période, très riche, est l'occasion de me former à l'usage des modèles de simulation de culture, au contact direct des chercheurs fondateurs du réseau DSSAT (K.K. Boote, G. Hoogenboom, G.Y. Tsuji, J.W. Jones, P.K. Thornton, G. Uehara). C'est aussi l'occasion de développer un partenariat solide avec des scientifiques reconnus dans leur domaine et experts internationaux sur l'ananas, en particulier le Pr. D.P. Bartholomew. Il me permettra ainsi de contribuer significativement, 10 ans plus tard, à la rédaction d'un ouvrage international de synthèse sur l'ananas à l'initiative des chercheurs américains (B6, B7, B8). Cet ouvrage fait encore référence aujourd'hui au niveau international.

II. Le métier d'animation scientifique et de gestion de la recherche

II.1. Des responsabilités opérationnelles de direction en tant que chef du Programme Ananas et Diversification Fruitière (1993-1996)

A l'issue de ce séjour de post-doctorat d'un an au College of Tropical Horticulture and Agriculture de l'Université d'Hawaii (UH), je suis affecté en octobre 1993 à Montpellier en qualité **d'adjoint au Chef du Programme Ananas et Diversification Fruitière** (alors Pierre Martin-Prevel). La structure des programmes au CIRAD-FLHOR change alors, conduisant, parmi d'autres modifications, à élargir le mandat du Programme Ananas aux autres fruitiers (passiflores, papayes mais également vigne et fraise cultivées en climat tropical) et à des espèces sous-utilisées (anonacées, cactacées, etc...). C'est donc dans le cadre de ce mandat récemment élargi que je participe à l'élaboration du schéma pluriannuel de programmation (SPP) du programme Ananas et Diversification Fruitière pour la période 1994-1998. C'est l'occasion d'une réorientation des activités du programme vers l'Asie (R14, R15) et l'Amérique Latine (en particulier, renforcement de nos activités en Colombie, dans le domaine des ressources génétiques notamment, en relation avec l'IPGRI). Les liens avec l'Afrique se modifient (R10, R16, R17, R18, R19) et les activités du programme dans les DOM se renforcent (mission à la Réunion et à l'île Maurice en mars 1994 et aux Antilles en juillet 1994)(R21).

En **Avril 1994**, je suis nommé **Chef du Programme Ananas et Diversification Fruitière** et responsable, à ce titre, de la conception et de la mise en oeuvre des activités de recherche, de développement et de formation au sein du Programme, qui rassemble une trentaine de chercheurs et ingénieurs. Les perspectives du Programme, décrites dans le Schéma Pluriannuel de Programmation, tiennent compte des nouveaux enjeux mondiaux; nous tenterons de les mettre en oeuvre dans un contexte budgétaire alors difficile.

En 1995 et 1996, une attention particulière est apportée à l'organisation du Programme dans les départements d'outremer (DOM), en particulier aux Antilles et à la Réunion (R26, R27). Le Programme joue ainsi un rôle déterminant dans les DOM en matière de diversification agricole et est impliqué dans plusieurs actions de recherche pour le développement (agriculture et diversification fruitière dans les Hauts de l'Est, développement de l'ananas Victoria et de la vigne à la Réunion, développement de l'ananas en Martinique et en Guadeloupe). Les Antilles constituent une base stratégique dans le domaine des ressources génétiques et de l'amélioration variétale de l'ananas pour lesquels le CIRAD-FLHOR a acquis un rôle international de premier ordre en matière de conservation (S2). La plus importante collection de ressources génétiques ananas du monde est réunie en Martinique et son évaluation fait l'objet de collaborations internationales avec différents pays d'Amérique latine dans le cadre d'un projet européen INCO-DC dont j'assure la coordination. Des synthèses sont réalisées et publiées sur ce thème, en collaboration avec des collègues généticiens (B2, B3).

L'année 1995 a été marquée par l'organisation par le CIRAD-FLHOR du II^{ème} Symposium International sur l'ananas, qui s'est tenu sous l'égide de l'ISHS du 20 au 24 février en Martinique. Ce symposium, qui a réuni 160 participants représentant 38 pays et 44 régions du monde, dont de nombreux pays en développement, a certainement témoigné du savoir-faire et de l'importance du CIRAD-FLHOR en matière de recherches sur l'ananas dans le monde. L'équipe du Programme que je dirige présente en Martinique s'est fortement mobilisée localement pour son organisation. Membre du Comité d'Organisation dirigé par P. Martin-Prevel, j'assurai également la Présidence du Comité Scientifique international de ce Symposium dont les actes ont été publiés (C28). Sur le plan scientifique, le symposium offrait une large couverture thématique, abordant les thématiques de l'amélioration variétale, des ressources génétiques et des biotechnologies, aussi bien que les champs de l'agronomie, de la protection des cultures ou de la qualité des fruits. Dans le champ de l'agronomie, les communications portent sur la compréhension du fonctionnement de la plante ou du peuplement en réponse aux facteurs environnementaux ou hormonaux (maîtrise de la floraison), les techniques de plantation ou encore le maintien de la fertilité des sols. Comme j'avais déjà pu le souligner dans l'allocution de clôture du symposium (C28) – mais ce regard doit être encore souligné aujourd'hui – on peut s'interroger sur la faible place réservée aux problématiques liées à l'environnement, en particulier les questions liées à l'impact et/ou la gestion raisonnée des pesticides, à l'utilisation et au devenir de l'azote, à l'utilisation des ressources en eau, ou, plus généralement, à l'ensemble des impacts de cette monoculture souvent intensive qui caractérise les systèmes de culture à base d'ananas. Dix ans après, force est de constater que le constat a relativement peu changé. Ainsi, même si la pression sociétale sur l'utilisation des pesticides s'accroît aujourd'hui, on peut considérer que les recherches sur ananas restent encore insuffisamment orientées vers la conception de systèmes de culture plus durables. Mais ce symposium aura marqué une étape importante dans les différentes tentatives de réunir et de mettre en commun les résultats de recherches souvent très sectorisées, et aura servi de tremplin à une coopération internationale accrue qui se manifestera peu après par une Pineapple Newsletter à destination des chercheurs et acteurs des filières ananas dans le monde.

Durant cette période, une attention particulière a également été portée au développement de nos activités en Amérique latine, avec 3 volets prioritaires (R20, R25) : i) une forte implication dans les réseaux de recherche sur les fruitiers andins et amazoniens (TROPIGEN, REDAFRUTHEX, REDARFIT), ii) un projet commun avec l'IPGRI qui assure au CIRAD une coordination à l'échelon international des activités de nos deux institutions dans le domaine des ressources génétiques fruitières d'origine andine et amazonienne, iii) le montage de projets de développement fruitiers visant à la diversification agricole dans des zones à forte pression de culture illicites (projets en Colombie et en Bolivie).

Enfin, la redynamisation de nos actions en Afrique de l'Ouest a été permise via le montage d'un Projet au Ghana financé par la Banque Mondiale, et à des initiatives propres à assurer le redémarrage de nos actions en appui à la filière ananas Afrique de l'Ouest (Projet Régional).

Dans le même temps, je réponds à la demande d'expertise en matière de gestion technique de plantation d'ananas qui émane de la sphère privée (R17, R22, R23, R24).

L'année 1996 a également été marquée par un investissement important de ma part pour des actions dépassant le cadre de mes fonctions de Chef de Programme mais pour lesquelles j'étais fortement motivé : j'ai ainsi répondu favorablement à la demande de la Direction Générale de participer au Groupe de Travail Management. Nous avons, dans le cadre de ce groupe de travail, effectué un diagnostic de l'Etablissement en matière de management, et proposé de nouvelles bases d'organisation pour le CIRAD (G1). Ce travail collectif a certainement marqué durablement ma perception de notre Institution et les rapports entre les groupes humains qui le constituent. Il a servi de base à la réforme mise en œuvre par la Direction Générale. Je me suis également impliqué, en accord avec la Direction Scientifique du CIRAD-FLHOR, dans l'animation de l'agronomie dans le champ des productions horticoles, dans le domaine de l'Ecophysiologie (montage d'une ATP, animation scientifique). Participant au Comité Scientifique AGER en tant que représentant du CIRAD-FLHOR, j'ai également été sollicité pour apporter ma contribution à la réflexion sur l'agronomie au CIRAD-CA.

II.2. Une fonction d'animation scientifique, de coordination et de prospective au sein de la Direction Scientifique du Cirad (1997- 2004)

Mon vif intérêt pour l'agronomie en tant que discipline scientifique, mon goût pour l'animation et le processus de production scientifique, mon souhait de voir le CIRAD remplir véritablement son rôle d'innovation scientifique dans son mandat de coopération constituent autant de raisons qui m'ont conduit à accepter la proposition de Michel Dron, alors Directeur Scientifique du Cirad, de me nommer à la fonction de délégué scientifique AGER, à la suite d'Hubert Manichon et de Jean Pichot, appelés à d'autres fonctions.

Nommé délégué scientifique pour la délégation AGER (Agronomie, Gestion de l'Environnement et des Ressources naturelles) en mars 1997, je rejoins alors l'équipe de la Direction Scientifique. J'occuperai cette fonction pour une durée de 7 ans, successivement sous la direction de Michel Dron (1997-2000), Michel Griffon (2001-2003), puis Anne-Marie Izac (à partir de 2004), directeurs scientifiques successifs du Cirad. Cette période très riche, prenante et exigeante, demandera et permettra à la fois mon ouverture à un champ thématique large et stratégique pour le Cirad, celui de l'agronomie et de la gestion de l'environnement et des ressources naturelles. Regroupant un large champ de disciplines scientifiques (agronomie, écophysiologie, science du sol, botanique, écologie, etc.) et champs thématiques (fonctionnement des couverts végétaux, fonctionnement des sols, fonctionnement des exploitations, analyse spatiale, etc.), la délégation rassemble un effectif élevé de chercheurs (environ le tiers des effectifs de chercheurs du Cirad) et représente un ensemble d'activités scientifiques au cœur du mandat du Cirad.

Les missions sont multiples et comprennent l'animation scientifique dans le champ de la délégation, l'ouverture prospective sur l'évolution du champ disciplinaire, la représentation du CIRAD auprès de diverses instances scientifiques, le montage d'actions incitatives, le suivi des thèses, etc. La tâche qui incombe au délégué peut donc paraître lourde, d'autant que près de 300

cadres scientifiques relèvent de la délégation AGER. Je bénéficie de 1998 à 2001 de l'appui de Guy Trébuil pour mener à bien cette mission.

II.2.1. Concevoir et mettre en œuvre un dispositif d'animation scientifique à l'échelle de l'organisme

L'année 1997 a été marquée par un investissement important de ma part pour accompagner la réforme du management au Cirad, décidée par la Direction Générale. Au delà de l'animation du Groupe de Travail ayant conduit aux propositions d'un programme d'Agronomie (G2), qui voit le jour en 1998, c'est tout un ensemble d'actions, visant à structurer les nouvelles équipes, que je mets en œuvre (réunions de concertation, projets d'équipe, etc.) et qui doit être animé. La constitution d'un programme d'agronomie au Cirad constitue un élément nouveau (il sera composé de 3 laboratoires, un laboratoire d'écophysiologie, un laboratoire des sols, et un laboratoire de télédétection et analyse spatiale). Loin de regrouper l'ensemble des recherches en agronomie (celles-ci restant majoritairement réparties dans les 7 départements du Cirad et dans les différents programmes pluri-disciplinaires qui les constituent), il constitue néanmoins un « noyau dur » important, orienté vers le développement d'outils et de méthodologies. Florent Maraoux en prendra la direction.

Des missions aux Antilles (R31), puis à la Réunion (R30), ont également permis durant cette année de faire le point sur les conditions de l'animation scientifique dans les DOM.

L'animation scientifique d'agents répartis dans 7 départements différents (subdivisés en 28 programmes) comprend des difficultés structurelles particulières. Celle-ci nécessite la mise en place d'une réflexion collective basée sur des outils et des procédures spécifiques qu'il a fallu concevoir et mettre en œuvre. Différentes actions ont été entreprises dans ce sens. Parmi les plus marquantes, il faut citer la préparation et la conduite d'une conférence électronique sur l'agronomie au Cirad qui a rassemblé durant 2 mois (octobre-novembre 1999) 320 participants. Cette conférence (une première au Cirad), co-organisée avec Guy Trébuil et Sandrine Renoir, nécessita une importante organisation technique, la rédaction de textes préparatoires aux débats, de synthèses intermédiaires hebdomadaires pour chacun des thèmes abordés ainsi qu'une synthèse finale des quelques 300 contributions échangées. Les actes complets furent édités sous la forme d'un cédérom interactif (E1) et une synthèse publiée dans la collection des documents de la Direction Scientifique du Cirad (E2).

A l'issue de la conférence électronique, de nombreux chercheurs ont sollicité de nouvelles formes d'animation et de dialogue, afin de poursuivre ce dialogue initié. Un site Intranet dédié aux agronomes du Cirad fut ainsi conçu par la délégation Ager. Celui-ci, l'un des premiers au Cirad, fut mis en place début 2000. Il visait à permettre la circulation de l'information concernant notre champ disciplinaire et à faciliter les échanges entre des agents de structures différentes et souvent éloignés géographiquement les uns des autres. Opérationnel de 2000 à 2004, ce site très consulté et mis à jour tous les mois avec la collaboration technique de Sandrine Renoir, assistante de la délégation, a constitué un nouvel espace de communication et permis une réelle animation scientifique via la diffusion d'informations sur la vie scientifique, la mise à disposition d'un ensemble de liens interactifs avec des annonces de séminaires, congrès, appels d'offres, soutenances, formations, revues électroniques, articles, etc. et la tenue de débats internes.

En réponse à un besoin identifié lors de la conférence électronique sur l'agronomie au Cirad, **l'année 2000** fut l'occasion d'organiser en collaboration avec la délégation scientifique MIA

(Mathématiques et Informatique Appliquées) un symposium sur le thème « pilotage des agroécosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision ». Composé de conférences invitées et de communications de chercheurs sélectionnées et/ou sollicitées, ce symposium avait pour objectif d'illustrer la grande diversité de démarches et d'outils disponibles sur le thème du pilotage des agroécosystèmes, à différentes échelles et selon différents niveaux d'intégration pluridisciplinaire. La qualité des articles soumis, améliorés par un processus original de relecture interne et externe, nous a permis de publier en coédition avec l'INRA un ouvrage collectif sur le thème « modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision » dans la collection « Repères » du Cirad. (E3). D'autres journées, souvent de nature pluridisciplinaire et associant plusieurs délégations furent par la suite organisées, dont un séminaire sur le thème des « plantes envahissantes » avec les délégations défense des cultures (MIDEC) et connaissance et amélioration des plantes (MICAP), qui a donné lieu à la publication d'actes (E4).

Au cours des années 2002-2004, le changement climatique a constitué un axe fort de l'animation scientifique de la délégation, avec pour perspective une meilleure prise en compte de cette problématique dans les travaux de recherche du Cirad. Il a nécessité un investissement volontariste de ma part au plan scientifique (voir plus loin). Avec l'appui de Bernard Seguin, président du comité scientifique de la délégation, des conférences sont données (C39, C52) et des articles sont produits (A5, P3, P4). Un ouvrage de synthèse qui vise à mieux faire connaître les actions entreprises par le Cirad dans ce domaine est réalisé et publié (E6).

II.2.2. Rapprochement avec l'INRA et construction des UMR

Durant le même temps, d'importantes évolutions institutionnelles se dessinaient, auxquelles il était important de participer. Sous l'impulsion de Michel Dron, la constitution d'UMR avec nos principaux partenaires de la recherche et de l'enseignement supérieur a rapidement constitué un objectif stratégique. De nombreuses discussions scientifiques et institutionnelles ont démarré dans les différents domaines scientifiques. Dans le domaine de l'agronomie et de la gestion des ressources naturelles, c'est avec l'INRA et l'AGRO-M que des projets ont émergé. J'ai alors œuvré, mandaté par la Direction Générale, à favoriser l'émergence de tels projets.

Le rapprochement avec l'INRA a fait l'objet de groupes de travail spécifiques chargés de faire des propositions concrètes. C'est ainsi qu'avec Jean Boiffin j'ai été chargé par les deux directions générales d'établir un bilan et de proposer des coopérations dans le domaine de l'Agriculture Durable (lettre de mission du 8 avril 1999). Mobilisant largement les équipes concernées de nos deux institutions, un rapport a été remis le 9 février 2000 aux deux Directions Générales, soulignant l'enjeu commun posé par l'Agriculture Durable à nos deux institutions, analysant le potentiel d'interaction et les divergences des modes d'organisation internes et suggérant les principales étapes vers une unification du dispositif national de recherche en agronomie (G9). Les propositions ont porté sur la mise sur pied de structures communes (dans les domaines de l'écophysiologie, la science du sol, les systèmes de culture), sur la constitution de réseaux scientifiques communs (dans les domaines du fonctionnement hydrique et biogéochimique des sols cultivés, de la caractérisation spatiale des milieux, de la modélisation des cultures, de la gestion des produits résiduels), et enfin sur la mise en place de projets de recherche communs.

Ce rapport a servi de base à d'importantes décisions stratégiques par rapport à la constitution d'unités mixtes⁴, le renforcement de la plate-forme commune de Montpellier, ainsi que par rapport à la mise en place du Fonds commun INRA-CIRAD visant à favoriser les projets scientifiques communs. Ce rapport a fait l'objet d'une large socialisation tant à l'INRA qu'au Cirad.

J'ai par la suite été amené à participer à l'élaboration des différents plans d'action INRA-CIRAD qui ont suivi, jusqu'au plan d'action 2005-2006.

Durant cette période, la volonté du Cirad de participer activement à la construction des UMR sur le site de Montpellier m'a amené à m'investir particulièrement dans la construction de l'UMR SYSTEM, dédiée au fonctionnement et à la conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens. C'est ainsi qu'avec Jacques Wéry j'ai participé activement à la préparation du projet scientifique de cette Unité, et à la coordination des discussions avec les équipes du Cirad susceptibles de la rejoindre.

II.2.3. Les Conseils Scientifiques de la délégation : un outil de politique scientifique

Durant la période 1997-2003, les actions conduites par les délégations scientifiques du Cirad reposent largement sur les orientations fixées par les Comités scientifiques de chaque délégation, qui se réunissent deux fois par an. Leur rôle est de donner un avis sur les orientations, modalités d'exécution et résultats des recherches, de donner un appui en matière d'animation scientifique, de conseiller la Direction Scientifique en matière de recrutement, formation, équipement, organisation, de donner un avis sur les projets, en particulier d'ATP. En 1999, en accord avec Michel Dron, le Conseil est remanié. Les membres extérieurs que le Directeur général et le Directeur scientifique nomment sur mes propositions comprennent des spécialistes du domaine, issus de plusieurs institutions françaises de recherche ou d'Universités et Ecoles d'Agronomie : le comité est constitué de Christian Feller, Robert Habib, Bertrand Ney, François Papy, Jean-Pierre Raison, Bernard Saugier, Gilles Thévenet, Jacques Wéry, sous la Présidence de Bernard Seguin. Préparées avec Bernard Seguin, les réunions du comité Ager traitent de questions scientifiques en relation avec les actions du Cirad, présentes ou à venir. Des thématiques comme le cycle du carbone dans les sols tropicaux, l'impact du changement climatique et l'adaptation des agricultures, ou le rapprochement écologie-agronomie sont abordées au cours de ces comités pour mieux orienter la stratégie du Cirad par rapport à ces enjeux scientifiques. Les comités sont également un lieu d'incitation, d'élaboration et de validation pour de nouveaux projets scientifiques (en particulier les projets d'ATP), qui constituent un outil important d'orientation de la stratégie scientifique du Cirad. Près d'une dizaine de projets d'ATP ont ainsi été appuyés par la délégation Ager entre 1999 et 2004 et financés par la Direction Scientifique⁵. Au de là de la phase de

⁴ Il propose en particulier la création d'une unité mixte Agro-M-INRA-Cirad dédiée à l'évaluation et la mise au point de systèmes de culture, qui deviendra l'UMR SYSTEM

⁵ **Liste des ATP Ager retenues de 1998 à 2003**

ATP 2003/NEUCAPALM Evaluation des pratiques de gestion de l'azote en agrosystèmes pérennes à sous-étage de légumineuses

ATP 2003/ CIROP, (crédit incitatif) : conception des innovations et rôle du partenariat

ATP 2002/11 : Les réserves carbonées chez le cocotier, le palmier à huile, l'hévéa et le manguier : origines, dynamiques et conséquences pour la gestion des plantes

ATP 2001/10 : Méthodes d'évaluation de l'impact agronomique et environnemental du recyclage agricole des déchets agro-industriels.

ATP 2000/11 : Séquestration de carbone par des plantations d'eucalyptus et de cocotiers

préparation et de sélection (je participe en tant que délégué scientifique à la commission d'évaluation des projets), le délégué doit assurer, le suivi du déroulement des projets retenus, via l'analyse des rapports et produits du projet et la participation aux ateliers que les responsables du projet organisent.

II.2.4. Participation aux politiques et actions de recrutement et d'évaluation des organismes de recherche

En 2000, le processus de relance stratégique élaboré par la Direction Générale se traduit par un plan de recrutement important et à une modification profonde des modalités de ce recrutement selon des critères qui privilégient désormais les compétences scientifiques des candidats pour les postes de chercheurs. La validation des profils, le suivi de la mise en place des jurys (sous la responsabilité des départements) et la conduite des entretiens avec les candidats⁶ (au titre de la direction scientifique) représente alors une part significative de mon activité (plus de 100 entretiens effectués, pour 30 postes de chercheurs ouverts dans le champ thématique entre 1999 et 2002). Cette activité m'a amené à contribuer activement au renouvellement des compétences du Cirad, élément décisif et déterminant du potentiel actuel de l'organisme en matière de Ressources Humaines.

La politique en faveur des doctorants menée par la Direction Scientifique du Cirad entre 1997 et 2005 a constitué un élément contribuant à la qualité scientifique de l'organisme. Cette politique a consisté en la gestion de soutiens financiers aux équipes qui encadrent des doctorants et en la mise en place d'un suivi de ces doctorants (rapports annuels, existence d'un comité de pilotage, modalités d'encadrement, suivi des règles). Dans le champ thématique Ager, 10 à 15 doctorants étaient inscrits, dont il fallait suivre l'évolution, en relation avec leurs encadrants et leurs départements de rattachement.

Le recrutement et l'évaluation des chercheurs constitue un domaine dans lequel j'ai été amené à assurer d'autres responsabilités. J'ai ainsi participé au jury d'admission du concours de directeur de recherche 2^{ème} classe de l'IRD en 2000 et au jury d'admission de chargé de recherche 2ème classe en 2001 et 2002. J'ai participé entre 2003 et 2006 à la Commission Scientifique Spécialisée (CSS) Agronomie, Elevage, Sylviculture de l'INRA, présidée par Bernard Thibaut, qui se réunit tous les ans pour évaluer au plan individuel les chercheurs de l'INRA rattachés à ce groupe disciplinaire. Je suis membre de la commission renouvelée en 2007 de cette commission, sous la présidence d'Alain Capillon. J'ai participé en 2005 au groupe de travail INRA sur l'évaluation des recherches en partenariat présidé par Elizabeth de Turkheim et Bernard Hubert.

En matière **d'évaluation collective**, j'ai participé en tant que membre aux commissions d'évaluation des Unités INRA APC (Unité Agropédoclimatique de la Guadeloupe) sous la présidence de Frank Warembourg (1999), et INRA-CIRAD SRA (San Giuliano, Corse) sous la

ATP 2000/12 : Modélisation de la croissance des fruits dans une architecture ligneuse pour une maîtrise de la production

ATP 1999/10 : Contribution à la modélisation du fonctionnement des systèmes de culture en semis direct sous couverture

ATP 1999/60 : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité; gestion des effluents d'élevage à la Réunion

ATP 1998/10 : Gestion des systèmes de culture et organisation collective de la production : élaboration d'une démarche d'aide à la gestion des périmètres irrigués

⁶ Il s'agit d'un entretien conduit avec chaque candidat, en parallèle du jury qui siège de manière indépendante. La décision de recrutement tient in fine compte des propositions du jury, et des entretiens avec la Direction Scientifique et la Direction des Ressources Humaines.

présidence de R.Charrier (2004). En juin 2005, à la demande du département Environnement et Agronomie de l'INRA, j'ai présidé la commission d'évaluation de l'UMR d'agronomie INRA/INA-PG de Grignon dirigée par Thierry Doré. A l'initiative de la direction de la Recherche et de la Stratégie du Cirad, j'ai proposé ma candidature à l'AERES pour faire partie du panel d'évaluateurs qui sera mis en place prochainement par la nouvelle agence.

Mon activité s'exerce également dans le domaine de l'**évaluation de projets** : je suis membre depuis 2005 de la commission Sciences agronomiques et écologiques de l'ANR chargée d'organiser l'évaluation des projets soumis et de statuer sur les projets retenus pour les appels d'offre « Non thématique » et « Jeunes Chercheurs » proposés par l'Agence.

Au cours de ces dernières années, j'ai donc été amené à conduire différentes actions de recrutement, d'évaluation individuelle et collective dans un contexte pluri-institutionnel. L'ensemble de ces activités m'a conduit à réfléchir aux modalités d'évaluation du métier de chercheur dans les conditions de la recherche finalisée. Le contexte d'évolution important dans lequel s'est inscrit le Cirad, le contexte différent dans lequel se situent l'INRA et l'IRD m'ont conduit ainsi à développer un point de vue spécifique sur ces questions, sur un thème central et stratégique pour les organismes eux-mêmes et pour les recherches qu'ils conduisent en terme de positionnement et de qualité. J'espère en particulier au cours de ces années avoir réussi à contribuer, par les actions suivies en matière de recrutement et d'évaluation, à développer les procédures à même de positionner le Cirad dans le groupe des organismes de recherche (procédures de recrutement et d'évaluation, individuelle et collective, de projets et d'unités).

II.2.5. Contribuer au positionnement stratégique du Cirad sur les grandes questions scientifiques

La mission de prospective au sein de la direction scientifique m'a également conduit à m'intéresser aux grandes questions scientifiques émergentes, dans la perspective de positionner l'organisme sur ces questions, en valorisant ses atouts et en identifiant ses faiblesses potentielles. Le Cirad, traditionnellement très impliqué dans les conditions de la production et de la productivité agricole depuis sa création, s'est progressivement engagé dans une réflexion plus large sur le développement durable, choisissant ce concept comme ligne de force de son action à travers le monde⁷. Ce changement conduit nécessairement à l'adoption de nouvelles postures et questions de recherche qu'il convient d'identifier et de formuler et c'est naturellement la direction scientifique qui est chargée de conduire cette réflexion. Les contributions du Cirad à la recherche pour le développement durable concernent plusieurs thématiques dont certaines comme « l'approche écologique de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage », « les conditions de la qualité et de la sûreté des produits agricoles tropicaux », « l'application participative des grandes conventions internationales sur l'environnement », « la gestion maîtrisée et partagée des territoires »⁸ sont en interaction directe avec les missions de la délégation Ager. Ces inflexions m'ont conduit à participer et/ou animer de nombreuses réunions visant à affiner la stratégie du Cirad dans ce domaine et à participer à l'élaboration du Projet Stratégique⁹.

Parmi les grandes questions abordées, celles ayant trait au changement climatique ont particulièrement retenu mon attention. Il m'est apparu comme essentiel que le Cirad puisse se

⁷ Nature, société et développement durable ; la contribution du Cirad, plaquette de présentation, 2002

⁸ Intitulés retenus par le Cirad dans la définition de sa stratégie

⁹ Le Projet Stratégique du Cirad, 2001-2010. Plaquette, éditions du Cirad.

positionner sur ce thème, ce qui n'était alors pas le cas, ou seulement dans les contextes très précis de certaines collaborations ou de certains chercheurs déjà sensibilisés. Après une période d'approfondissement de la thématique, mon action a alors visé à promouvoir, soutenir et encourager les initiatives des équipes de recherche du Cirad dans ce domaine, souvent avec l'appui de Bernard Seguin, président du comité scientifique Ager, et chargé de la réflexion dans ce domaine à l'INRA. Les compétences progressivement acquises dans ce domaine m'ont conduit à donner plusieurs conférences sur le thème du changement climatique lors de différentes manifestations dédiées au changement climatique ou au développement durable (C37, C39, C40, C52), à réaliser et publier plusieurs articles scientifiques (A5) et de vulgarisation (P3, P4, P5) ainsi qu'un ouvrage de synthèse de grande diffusion (E6). Malgré un éloignement progressif de cette thématique (cf. mon projet de recherche actuel dans la troisième partie de ce mémoire), j'ai été désigné pour représenter la recherche française (INRA, CIRAD, CEMAGREF, IRD) au séminaire préparatoire du Challenge Program Climate Change organisé par le CGIAR et la communauté SSSP à Oxford en février 2007.

Mes orientations de recherche plus récentes concernant le rôle de la biodiversité dans les systèmes de culture m'ont conduit aussi à contribuer à l'animation transversale de ce thème au niveau du Cirad, à travers plusieurs actions d'envergure auxquelles j'ai participé ou que j'ai directement organisé. A la demande de la direction du département PERSYST et de la direction de la Recherche et de la Stratégie du Cirad, j'ai ainsi organisé avec mes collègues Eric Loffeier, Jean Louis Sarah et Patrick Dugué une journée d'animation sur le thème de l'intensification écologique (L'intensification écologique : du concept au terrain, quelles démarches de recherche ?) le 30 août 2007, journée fortement suivie et médiatisée, à laquelle ont participé de nombreux chercheurs. A travers les communications de scientifiques extérieurs reconnus et de projets de recherche du Cirad, une telle journée contribue à positionner les chercheurs du Cirad sur de nouveaux thèmes de recherche prioritaires ou faisant l'objet, comme c'est le cas ici, d'un appel d'offre spécifique (ANR).

Récemment, la mise en place des nouveaux départements du Cirad et les changements intervenus en matière d'organisation et de management ont conduit la Direction Générale du Cirad à revoir les circuits d'animation scientifique dans l'organisme (rôle respectifs des départements et de la direction scientifique, etc.). Le nouveau département PERSYST, qui regroupe la plupart des unités de recherche en agronomie du Cirad, va désormais jouer un rôle central dans ce domaine, sur les plans opérationnels et scientifiques. Robert Habib, qui assure la direction de ce département, et Etienne Hainzelin, directeur de la Recherche et de la Stratégie au Cirad, m'ont chargé de proposer un dispositif d'animation scientifique adapté à l'animation de la discipline et m'ont demandé de conduire ce dispositif. J'ai par ailleurs été sollicité par les directions des départements PERSYST et ES pour faire partie de leur Comités de Programme respectifs, instances chargées du pilotage stratégique des départements, composées pour partie de scientifiques extérieurs, et de membres élus et nommés par les départements.

III. Le métier de direction de recherche

III.1. L'encadrement de thèses

Au cours des années 1996-2004 l'ensemble des activités d'animation scientifique et de gestion de la recherche qui m'incombent, ainsi que les responsabilités qui les accompagnent, conditionnent un emploi du temps assez chargé et rendent in fine difficile un investissement fort et direct dans une activité de recherche personnelle. Je parviens néanmoins à conserver cette part significative de recherche, d'abord à travers la co-direction de la thèse d'Alexandra Jullien (sous la direction de

Bertrand Ney), qui développe sous mon encadrement un travail original sur le fonctionnement du bananier en phase de remplissage du fruit. Ce travail, qui sera soutenu en décembre 2000 à Paris a fait l'objet de 3 publications dans des revues scientifiques internationales (A2, A3, A10) et de plusieurs communications dans des congrès internationaux (C33, C34, C36). A l'issue de ce travail, Alexandra Jullien réussit le concours de maître de conférences à l'INA-PG, établissement au sein duquel elle enseigne aujourd'hui.

Au plan de l'encadrement scientifique, l'effort est poursuivi avec l'encadrement de Philippe Tixier et Nathalie Lamanda dont j'ai co-dirigé les travaux¹⁰ et qui soutiennent respectivement leurs thèses le 14 décembre 2004 à Montpellier et le 29 juin 2005 à Paris. Plusieurs articles sont publiés dans des revues scientifiques internationales (A4, A6, A7, A8) ou nationales (AN6) ou sont acceptées et seront publiés prochainement (A9). Plusieurs communications sont effectuées dans des congrès internationaux (C38, C41, C43, C44, C45, C46, C49, C53). Ils obtiendront tous les deux des emplois dans le domaine de la Recherche¹¹.

Dans la période récente (cf infra), de nouveaux projets de thèse sont construits en cohérence avec le projet scientifique de l'UMR SYSTEM. Je sou mets et obtiens en 2006 une demande d'accréditation à diriger des recherches auprès de l'Ecole Doctorale SIBAGHE. Les projets de thèse construits, qui s'inscrivent dans le projet scientifique de l'équipe PERSAFT que je dirige dans l'UMR répondent en priorité à une demande de chercheurs confirmés du Cirad qui souhaitent s'inscrire dans une trajectoire de recherche plus affirmée : Olivier Deheuvels (UMR SYSTEM) et Patrick Jagoret (UR Systèmes de pérennes) ont ainsi démarré en 2006 et 2007 leurs thèses sous ma direction ou co-direction.

III.2. La direction d'équipe

III.2.1. La genèse de l'UMR SYSTEM (1999-...)

En 2000, sous l'impulsion forte de Michel Dron, directeur scientifique du Cirad, un processus volontariste de création d'UMR est engagé, en particulier sur Montpellier, avec l'INRA et l'Agro-M. Dans le domaine de l'agronomie et de la gestion des ressources naturelles dont je suis alors responsable à la direction scientifique, émergent un certain nombre de propositions qui feront l'objet d'un rapport remis aux directions générales par Jean Boiffin et moi-même (G9). La nécessité de créer une structure commune dans le domaine de l'agronomie apparaît alors stratégique. L'UMR System (fonctionnement et conduite des SYStèmes de culture Tropicaux Et Méditerranéens)¹² est alors créée pour développer à Montpellier l'Agronomie Systémique¹³ et l'affirmer dans le contexte local comme la discipline scientifique centrale de l'Agronomie. La direction en est confiée à Jacques Wéry. Fortement associé à la création de l'Unité, la première phase (2001-2004) a été largement consacrée à la démonstration de sa viabilité et de sa place

¹⁰ En collaboration avec Philippe Martin et sous la direction de Thierry Doré pour Nathalie Lamanda, sous la direction de Jacques Wéry pour Philippe Tixier

¹¹ Tous deux ont été recrutés au Cirad en 2006 sur des postes de chercheur en CDI : au Cirad-Flhor pour Philippe Tixier , au Cirad/CP dans l'UMR SYSTEM pour Nathalie Lamanda. Ils font tous deux partie aujourd'hui du département PERSYST

¹² Identifiée par la DGER sous le numéro UMR 1123, par l'Inra sous le numéro 1230 et reconnue au 1/01/05 comme unité Cirad sous le numéro UMR 66.

¹³ Cette discipline, largement issue des travaux de l'INA-PG-INRA Grignon depuis 30 ans, est basée sur l'application de l'approche système aux parcelles cultivées. Ce terme, que nous avons proposé dans le rapport d'évaluation de notre UMR en 2002, s'est depuis imposé au sein du département EA de l'INRA et est utilisé dans le rapport d'évaluation de ce département (2003).

dans le contexte montpelliérain. En 2004, après 7 années passées à la Direction Scientifique, j'éprouve le besoin de renouer plus directement avec une activité de recherche opérationnelle, tout en confortant l'émergence de l'UMR SYSTEM récemment créée. J'accepte alors la proposition de Jacques Wéry d'assurer la fonction de directeur-adjoint de l'Unité. Cette proposition est alors validée par les directions générales des 3 organismes fondateurs (Agro-M, INRA, Cirad). Je rejoins alors à plein temps l'Unité en qualité de directeur adjoint.

Dans un contexte institutionnel difficile il a fallu mettre en cohérence les stratégies scientifiques de 4 départements Cirad (Amis, Ca, Cp et Flhor) et d'un département Inra (EA). Ceci a imposé l'identification de la spécificité de l'Agronomie Systémique et de ses points de synergie avec les autres disciplines de l'Agronomie centrées sur un des composants du champ cultivé (science du sol, écophysiologie, bioclimatologie), sur des échelles plus englobantes (système de production, système agraire) ou sur des outils (géomatique)¹⁴. L'évolution des effectifs de l'UMR traduit les difficultés de cette construction d'une discipline nouvelle qui imposait une reconversion pour la plupart des chercheurs qui ont créé l'UMR. Après l'évaluation de 2002, l'UMR s'est engagée dans une phase de consolidation de son projet et de sa structure, sur la base d'effectifs plus réduits au niveau du Cirad, mais avec une meilleure adéquation entre le projet d'unité et les compétences et objectifs des individus (2003-2004). Côté Cirad, les trois départements filières : Ca, Cp et Flhor ont confirmé leur engagement dans l'unité et ont fait de la problématique scientifique de l'UMR une de leurs priorités. Sur ces bases, l'UMR est devenue au premier janvier 2005 une des nouvelles unités de recherche du Cirad (UMR 66) sur lesquelles se fonde la réforme des structures de cet organisme. La nouvelle organisation du Cirad en unités de recherche donne alors un cadre totalement opérationnel à l'Unité (affectation des agents, budget, programmation, etc.). L'Unité comprend alors des agents de l'AGRO-M, de l'INRA (département Environnement et Agronomie) et de 3 départements du Cirad (CP, CA et FLHOR). La structuration opérationnelle de l'Unité demande une mobilisation forte tant au plan scientifique, humain, administratif, organisationnel. Je rejoins le département CP (Cultures pérennes) où je suis affecté compte tenu de ma volonté de développer mes recherches dans le domaine de l'agroforesterie tropicale dans l'Unité et de la volonté de ce département de développer de manière volontariste les recherches sur ces systèmes qui s'avèrent stratégiques au plan international.

En janvier 2007, l'UMR SYSTEM devient l'une des unités mixtes de recherche du nouveau département PERSYST, dont le rôle méthodologique pour le nouveau département est confirmé. En tant que directeur adjoint de l'Unité, j'assure par délégation du directeur un ensemble de tâches de management (programmation, évaluation, construction et suivi des budgets, etc.). Côté INRA, le département EA a confirmé, à l'occasion de l'évaluation de l'Unité en Février 2005, son objectif de faire de l'UMR une des unités ressources sur les approches systèmes et les systèmes de culture à base de plantes pérennes. L'avenir de l'UMR se déclinera dans les 3 ans qui viennent par l'affirmation de son rôle central dans le pôle Montpelliérain (SupAgro et ED SIBAGHE pour la formation et IFR Ecosystem pour la recherche) et de son positionnement scientifique national et international sur l'approche système et les systèmes de culture plurispécifiques.

¹⁴ Des chercheurs de la plupart de ces disciplines étaient présents dans l'unité lors de sa création, principalement ceux issus du programme Agronomie du département AMIS du Cirad, ainsi que les écophysiologistes du Cirad-Cp et Ca. Ces chercheurs n'ont finalement pas continué dans la construction d'une discipline systémique et ont quitté l'UMR en 2003.

III.2.2. L'animation et la direction d'équipe

Pour répondre à ses objectifs, l'Unité a organisé son activité scientifique autour de 2 axes complémentaires et hiérarchisés, l'un sur les méthodologies de conception des systèmes de culture (axe 1), l'autre orienté sur l'écologie fonctionnelle du champ cultivé (axe 2)¹⁵. Ces 2 axes nous permettent d'orienter de manière volontaire nos recherches dans deux directions : la construction d'outils pour l'aide à la décision d'une part, orientation qui nous rapproche des sciences de la décision, et la production de connaissances dans le domaine de l'écologie fonctionnelle d'autre part, orientation qui nous rapproche de l'écologie. Mes orientations scientifiques conduisent Jacques Wery à me confier l'animation de l'axe 2, Christian Gary étant chargé de l'animation du premier axe. L'animation scientifique des deux axes qui constituent l'Unité se met en place progressivement, compte-tenu de leur identification récente (à l'occasion de l'évaluation à mi-parcours en février 2005) et de la dispersion géographique de l'unité jusqu'en janvier 2006. Cette animation s'appuie sur différentes actions : séminaires internes et externes, groupes de lecture ou de partage de compétences thématiques, co-encadrements d'étudiants, rédaction de réponses à des appels d'offre, participation à l'enseignement, planification des sujets de thèse et des demandes de recrutement de chercheurs et d'enseignants-chercheurs., etc.

Au plan opérationnel, l'Unité est par ailleurs organisée en 5 équipes structurées autour de types de systèmes (cf. organigramme). Dans ce cadre, j'ai également pour responsabilité de structurer et de diriger l'équipe dédiée à l'agroforesterie tropicale, l'une des 5 équipes qui composent l'Unité¹⁶. L'équipe, composée de 6 chercheurs permanents du Cirad, intervient aujourd'hui dans le cadre de différents projets de recherche en Guinée forestière, au Cameroun et au Costa Rica¹⁷. Dans ce cadre, j'initie et participe au montage de plusieurs projets. Je contribue dès 2004 au montage d'un projet FSP en Guinée forestière impliquant le Cirad, et financé par le MAE (R38). Ce projet a démarré et vu l'affectation en 2006 de Nathalie Lamanda, chercheuse de l'équipe. Je contribue au montage de l'ATP CARESYS (2005-2007), projet coordonné par Frank Enjalric, chercheur de l'Equipe. Je participe aux négociations et au montage scientifique et institutionnel du PCP¹⁸ Agroforesterie avec le CATIE. Olivier Deheuvels, chercheur de l'équipe, est d'abord affecté au CATIE dans le cadre du PCP pour y conduire sa thèse que je dirige. Bruno Rapidel, un chercheur de l'équipe, est ensuite nommé coordinateur de ce projet important au plan institutionnel et scientifique et affecté mi-2007 au Costa Rica pour le conduire. En quelques années, l'Equipe Agroforesterie acquiert ainsi une lisibilité importante, à travers des projets reconnus.

¹⁵ Voir le rapport d'évaluation de l'UMR SYSTEM, quadriennal 2007-2010.

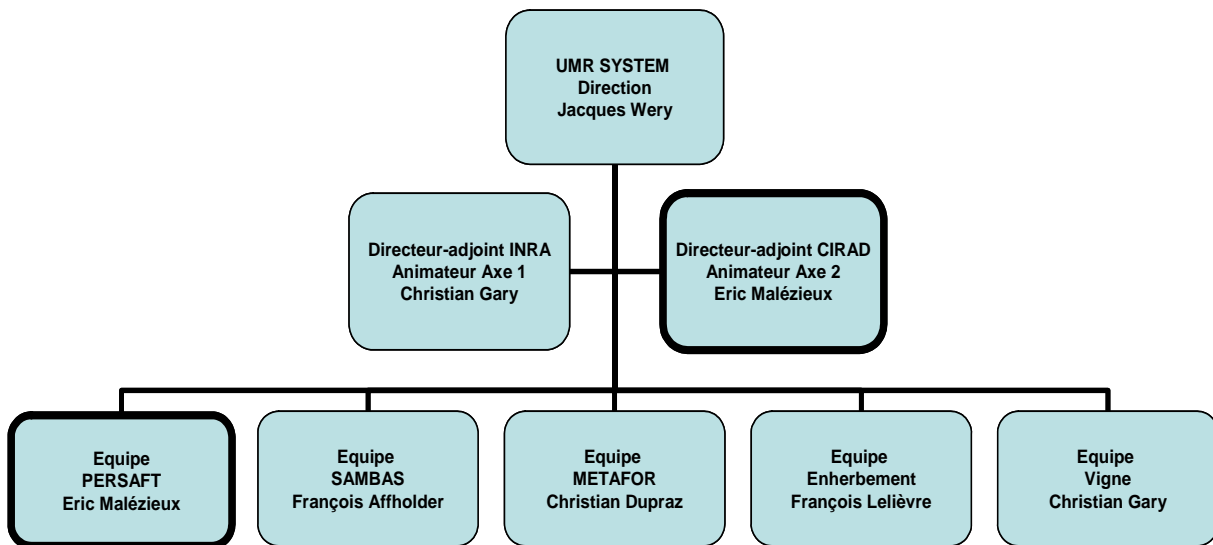
¹⁶ L'UMR SYSTEM comprend les équipes « Vigne », « Enherbements », « Agroforesterie tempérée », « Systèmes agroécologiques à base d'annuelles » et « Systèmes agroforestiers tropicaux »

¹⁷ Le projet scientifique que je mets au point dans ce cadre est développé dans la troisième partie de ce mémoire

¹⁸ PCP= Pôle de Compétence en Partenariat. Il s'agit d'une forme de collaboration durable mise en place par le CIRAD avec certains de ses partenaires privilégiés

Organigramme de l'UMR SYSTEM

L'Unité est structurée en 5 équipes autour de 2 axes scientifiques



III.3. L'activité d'enseignement

L'activité d'enseignement n'a jamais constitué la trame principale de mon activité mais j'ai toujours répondu avec intérêt aux sollicitations de mes collègues enseignants pour « faire passer » un certain nombre de méthodes, d'outils, de résultats de recherche auprès des étudiants, et participer activement à la structuration de leurs modules. J'ai toujours beaucoup apprécié ces échanges, qui se sont souvent traduits par un intérêt réciproque des étudiants pour les éléments enseignés, intérêt manifesté par un attrait pour la recherche agronomique tropicale sous la forme de stages outremer dans les laboratoires de recherche du Cirad, voire de thèses.

Mes interventions ont bien sur surtout porté sur mon activité de recherche proprement dite, associant la définition de concepts et d'outils à leur illustration dans le cadre de la recherche tropicale ou il s'appliquait. Ces formations s'adressent surtout au niveau du 3^{ème} cycle (DEA, DAA, Master) dans des formations destinées à de futurs ingénieurs agronomes ou de futurs chercheurs. J'enseigne ainsi dans divers établissements et universités (INH, AgroParisTech, SupAgro, Universités d'Orsay, Lyon, Montpellier)¹⁹. Au-delà de l'intérêt direct pour les étudiants, les qualités nécessitées pour l'enseignement exercent me semble-t-il un retour très positif sur l'activité de recherche (clarté des idées et des exposés, explication des concepts et des contextes, structuration du discours, etc.).

IV. Conclusion

De l'activité de recherche proprement dite à l'animation et la direction de la recherche, ces 20 années dédiées à la recherche agronomique pour le développement durable des pays du Sud rassemblent une large palette d'activités. De l'écophysiologie à l'agronomie systémique et à l'écologie, des systèmes de culture horticoles aux systèmes agroforestiers, l'évolution disciplinaire et thématique doit également être soulignée. Nous tâcherons dans la partie suivante de ce mémoire (partie II) d'esquisser une synthèse des activités scientifiques conduites dans ce cadre ou du moins d'en dégager les traits saillants, avant de proposer dans la troisième partie un projet scientifique nouveau, qui devra contribuer au renforcement des thématiques de l'UMR SYSTEM dans lequel il se positionne.

¹⁹ La participation à l'enseignement est décrite en annexe

DEUXIEME PARTIE

Mémoire de travaux scientifiques

De l'écophysiologie à l'agroécologie, contribution aux recherches sur les systèmes de culture

Introduction

Ce mémoire de travaux tente de faire une courte synthèse de 20 années de recherches (1985-2006) qui se situent dans le vaste domaine de l'agronomie et de l'horticulture en zone tropicale. Ces recherches portent sur le fonctionnement des systèmes de culture tropicaux, et s'inscrivent clairement dans l'ensemble des recherches sur les systèmes de culture, caractérisées par une vision systémique du champ cultivé, objet central d'étude de l'agronome (Sébillotte, 1974, 1978). Le concept de système de culture occupe ainsi une place centrale dans mes travaux.

Ces recherches ont été mises en œuvre sur des agrosystèmes tropicaux, d'abord monospécifiques (ananas, bananier), puis plurispécifiques (systèmes agroforestiers), dans des conditions écologiques, économiques et sociales diverses. Ce mémoire propose de revisiter – selon une ligne somme toute chronologique- un ensemble choisi de questionnements et de résultats extraits de ces recherches sur les systèmes de culture (tropicaux), ensemble marqué par un élargissement progressif des problématiques, et par la conception et la mobilisation d'outils et de méthodes diversifiés pour y répondre. Alors que les échelles d'espace et de temps concernés sont d'abord le champ cultivé (considéré comme homogène) et le cycle cultural, on s'intéressera progressivement à des peuplements plus complexes, à la fois dans l'espace (population d'individus hétérogènes ou combinaison d'espèces) et dans le temps (succession de cycles culturels annuels, temps long des espèces pérennes). Cette progression nous amènera à nous interroger sur le concept de système de culture et à son utilisation dans un cadre nouveau.

Le champ cultivé -vu comme un système- peut-être considéré comme un ensemble d'entités biologiques et physiques en interaction, sous l'effet d'actions anthropiques et d'évènements climatiques. Constitué d'un sol (lui même caractérisé par des variables physiques, chimiques et biologiques) en interaction avec un peuplement végétal, le système « champ cultivé » peut être décrit par des sorties (rendement, flux de minéraux, flux de polluants, etc.) en relation avec des entrées (climat, pratiques). Les interactions entre ces différentes entités et variables peuvent s'aborder pour différents objectifs et selon différentes démarches. Nous avons en effet été amenés au cours de nos recherches à nous appuyer sur une complémentarité entre une démarche **expérimentale**, une démarche de **diagnostic** et une démarche de **modélisation**.

Mes travaux ont consisté dans un premier temps à étudier le **fonctionnement du peuplement végétal** au sein du champ cultivé, et à construire de nouveaux outils dans cette perspective. Principalement basés sur les outils et méthodes de l'écophysiologie, ces travaux, décrits dans le premier chapitre de ce mémoire, ont porté sur les peuplements d'ananas et de bananier, deux espèces monocotylédones tropicales herbacées semi-pérennes de nature horticole qui font l'objet d'une culture intensive en zone tropicale humide.

La modélisation du fonctionnement d'un peuplement végétal constitue une étape essentielle pour comprendre puis optimiser la productivité de ce peuplement ou la qualité biologique des produits récoltés. Mais les outils développés dans ce domaine sont généralement adaptés à des systèmes homogènes et volontairement simplifiés (ananas et bananier sont ainsi considérés comme des peuplements homogènes) et simulent les processus à l'échelle d'un cycle cultural ou d'une partie de ce cycle cultural. Pourtant, on peut faire l'hypothèse que la prise en compte de l'hétérogénéité et la réintroduction d'une plus grande diversité biologique cultivée dans ces systèmes constituent un moyen

efficace de diminuer l'utilisation d'intrants chimiques. Les recherches portant sur des systèmes plus complexes (en particulier ceux composés d'entités hétérogènes), restent pourtant rares en agronomie, a fortiori sur des pas de temps longs, qui dépassent le cycle cultural. L'impérieuse nécessité de prendre en compte les questions environnementales dans les systèmes que nous étudions va ainsi nous conduire à construire un autre point de vue sur le champ cultivé et le système de culture, prenant en compte leur structure hétérogène, ainsi que leur évolution sur un pas de temps plus long, composé de plusieurs cycles culturaux.

Mes recherches s'orientent alors dans cette direction et portent sur deux systèmes différents qui permettent d'aborder **l'hétérogénéité de la structure du peuplement** dans des systèmes monospécifiques (chez le bananier) et dans des systèmes plurispécifiques (le cocotier dans les systèmes agroforestiers). Des outils originaux de modélisation sont conçus dans ce but. Les principaux résultats de ces recherches sont présentés dans le second chapitre de ce mémoire. A l'issue de ces travaux, l'expérience acquise mais aussi les évolutions disciplinaires de l'agronomie m'amènent à orienter le cheminement de mes recherches. Les travaux d'écophysiologie que je conduisais étaient en phase directe avec un questionnement lié au fonctionnement du système de culture. Petit à petit, la nécessité de prendre en compte un ensemble de facteurs plus large que les facteurs bioclimatiques sensu stricto pour rendre compte de ce fonctionnement m'amènent à mobiliser plus largement les concepts de l'agronomie systémique. Au même moment, la discipline de l'écophysiologie, en réponse certainement aux avancées de la génétique, se rapproche des disciplines analytiques de la biologie végétale. Je suis donc amené à revoir mes objectifs et questions de recherche même si les méthodes de l'écophysiologie devront continuer à alimenter nos recherches²⁰.

Le troisième chapitre de ce mémoire de travaux porte sur **l'évaluation et la conception de systèmes de culture durables**. Dans un premier temps, et dans le prolongement de ce qui précède, c'est sur bananier que nous mettrons en œuvre ces nouvelles démarches, dans le contexte de l'agriculture antillaise, marquée par une forte utilisation de pesticides. Les systèmes agroforestiers en zone tropicale humide et en particulier les systèmes à base de cocotier au Vanuatu constitueront un autre type de système de culture complexe étudié. Beaucoup des outils et méthodes de l'agronomie aujourd'hui ont été conçus et mis en œuvre sur des systèmes à base de cultures annuelles en zone tempérée. Ce travail nous permettra d'aborder la pertinence de ces concepts et méthodes dans un contexte radicalement différent, à la fois aux plans écologique et social, mais surtout de proposer de nouvelles méthodes. Il constitue un préalable au projet de recherche proposé dans la troisième partie de ce dossier d'habilitation.

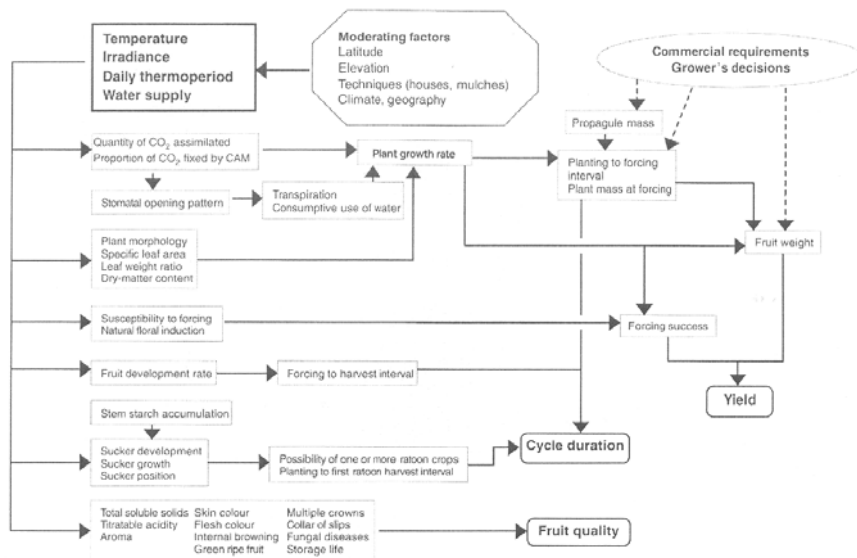
I. Comprendre et modéliser le fonctionnement des peuplements végétaux. Application à deux monocotylédones tropicales herbacées semi-pérennes : l'ananas et le bananier

I.1. La croissance et l'élaboration du rendement chez l'ananas (*Ananas comosus* L. Merr)

L'ananas, malgré son importance économique et son originalité botanique²¹ a fait l'objet d'un investissement limité en matière de recherche dans le domaine du fonctionnement agrophysiologique.

²⁰ L'utilisation des modèles 3D pour le diagnostic agronomique en situations complexes est un exemple de cette nécessité

²¹ L'ananas est la seule plante cultivée au métabolisme crassulacéen



Flow diagram summarizing the effects of environmental factors, but mainly temperature, on pineapple growth and development.

Extrait de B6. Schéma résumé des effets des facteurs environnementaux, et en particulier la température, sur la croissance et le développement de l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr). Ce diagramme servira de base aux travaux de modélisation du fonctionnement du peuplement, visant à prévoir la phénologie, le rendement et quelques caractéristiques de la qualité du fruit.

La thèse que j'ai soutenue en 1988 intitulée Croissance et élaboration du rendement de l'ananas (*ananas comosus* (L.) Merr.) (T2) sous la direction du professeur Sebillotte établit et quantifie les principales relations fonctionnelles entre variables du climat et composantes du rendement pour cette espèce monocotylédone semi-pérenne tropicale. Ce travail a contribué à mettre au point des méthodes génériques pour l'analyse de l'élaboration du rendement des cultures, et a fourni des résultats nouveaux sur le fonctionnement de l'ananas. Ces résultats serviront de socle à la modélisation du fonctionnement de cette culture que j'ai réalisée dans un deuxième temps, ainsi qu'à l'élaboration de méthodes d'optimisation des pratiques (en particulier, optimisation des dates de plantation, d'induction florale, de récolte).

L'objectif initial est d'établir un schéma d'élaboration du rendement qui rend compte du fonctionnement d'un peuplement d'ananas dans différentes conditions environnementales (AN2, AN3, AN4, C1, C7, C20). Une forme résumée de ce schéma est présentée sur le schéma ci-contre (extrait de (B6)). Ces recherches sont appuyées sur un important dispositif expérimental basé sur la station de l'Anguédédou en Côte d'Ivoire²².

Selon un schéma simple, le poids du fruit peut se décomposer en un nombre d'yeux (un œil correspond à l'évolution d'une fleur de l'inflorescence) auquel est affecté un poids individuel moyen (qui traduit l'efficacité du remplissage du fruit). Après avoir étudié la dynamique de croissance des différents organes aériens de la plante au cours du cycle (feuilles, pédoncule, fruit, couronne) dans différentes conditions expérimentales, le rôle de la biomasse aérienne présente à l'induction florale sur la détermination des composantes du rendement a été analysé (C8). La figure 1 illustre ces relations dans le cas de plantations mensuelles réalisées pendant 6 ans en Côte d'Ivoire. Le rôle de la biomasse se traduit par un effet sur le nombre de fleurs de l'inflorescence, première composante du rendement définie (figure 1a), et sur le poids du fruit (figure 1b). Ce rôle de la biomasse est essentiel dans la conduite de la culture de l'ananas compte tenu de l'une des particularités de cette plante, à savoir la possibilité d'induire artificiellement la floraison en condition de culture, via l'application d'éthylène ou d'acétylène dissous dans l'eau sur le bourgeon terminal.²³ La maîtrise de la biomasse au moment de l'induction florale constitue ainsi un facteur déterminant dans la conduite de la culture et la maîtrise de son rendement. On montre aussi que ces relations sont modifiées par les conditions de croissance qui règnent au moment de l'élaboration de la composante (par exemple, un stress hydrique ou un faible rayonnement lors du mois qui succède l'induction florale affecte le nombre d'yeux – figure 1a).

On a ainsi pu relier (C3) la vitesse de croissance durant la phase de formation des fleurs (période de fonctionnement du méristème terminal sous une forme « florale »), à la surface foliaire de la plante, aux disponibilités en azote, et aux conditions de compétition pour la lumière et pour l'eau. C'est cette vitesse de croissance qui détermine le nombre de fleurs (qui deviendront des « yeux » sur le fruit), première composante du rendement définie. Il est également montré que le poids de l'œil, deuxième composante du rendement définie, dépend des conditions source-puits qui règnent en fin de cycle dans la plante (C4).

²² Je travaillerai de 1984 à 1992 sur ce dispositif, voir la partie I de ce mémoire.

²³ Cette pratique est largement répandue partout où l'ananas est cultivé, y compris chez les petits planteurs des zones tropicales des pays en développement

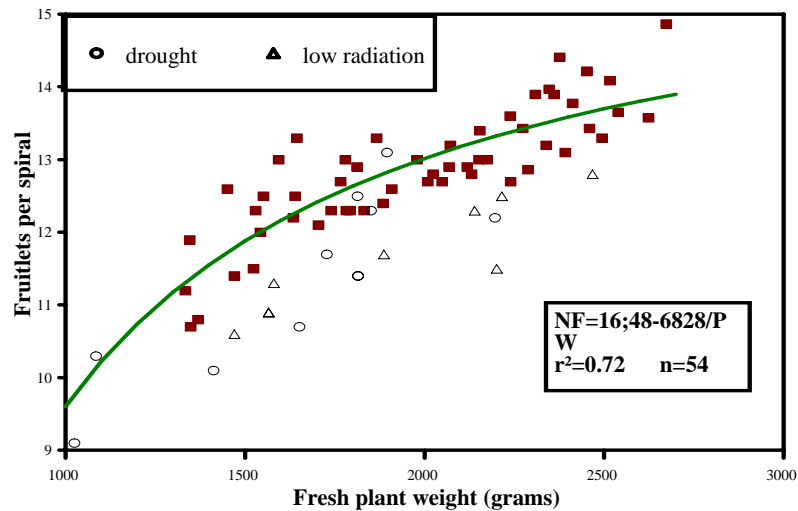


Figure 1a : Relation entre le nombre moyen d'yeux par spirale à la récolte et le poids moyen des parties aériennes (feuilles + tige) au moment de l'induction florale pour des parcelles plantées mensuellement pendant 6 ans en Côte d'Ivoire. Les triangles et ronds indiquent respectivement les mois où le rayonnement est le plus faible et les mois les plus secs. **D' après C8.**

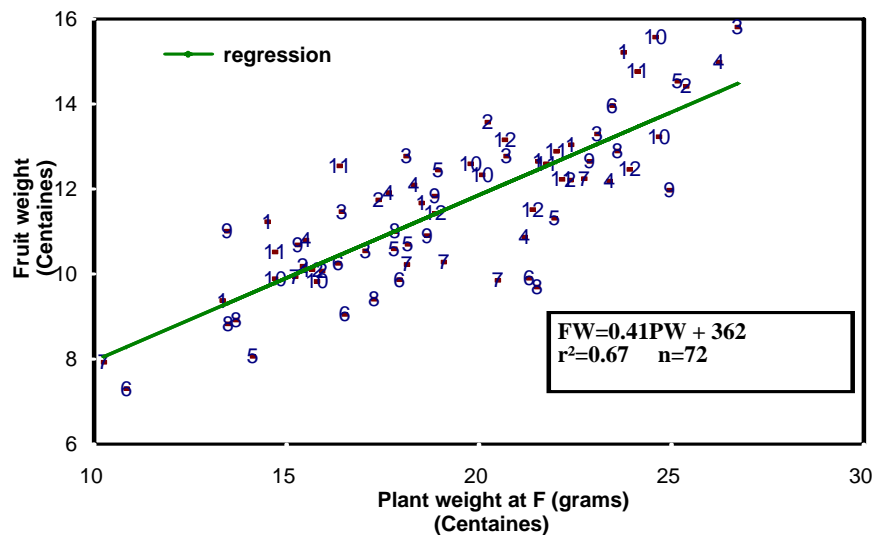


Figure 1b : Relation entre le poids moyen du fruit à la récolte et le poids moyen frais des parties aériennes (feuilles + tige) au moment de l'induction florale pour des parcelles plantées mensuellement pendant 6 ans en Côte d'Ivoire. Chaque point représente un mois de plantation (de 1 à 12). L'induction florale est réalisée dans tous les cas 8 mois après la plantation. **D' après C8.**

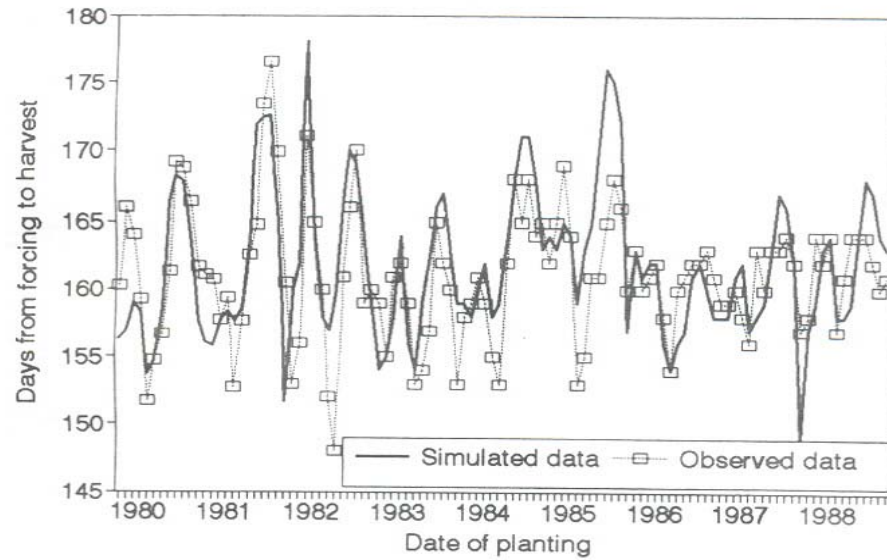


Figure 2 : Nombre de jours entre l'induction florale et la récolte, simulé et observé, pour 108 parcelles plantées mensuellement de 1980 à 1988 en Côte d'Ivoire. **Extrait de A1.**

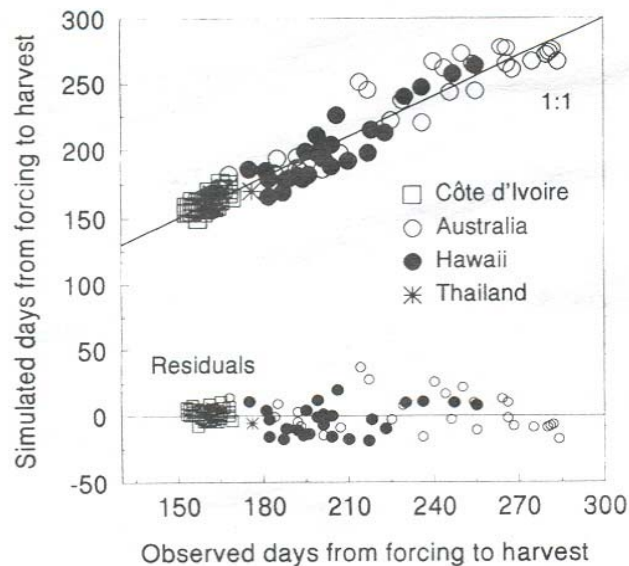


Figure 3 : Nombre de jours simulé par le modèle entre l'induction florale et la récolte en fonction du nombre de jours observé, pour des parcelles d'ananas cv Cayenne lisse cultivées en Australie (n=30), en Côte d'Ivoire (n=72), à Hawaii (n=25) et en Thaïlande (n=3). Résidus de la relation. **Extrait de A1.**

Il était donc important de mieux comprendre et quantifier l'élaboration de cette biomasse végétative. On a ainsi quantifié les rôles respectifs de la durée et de la vitesse de croissance sur l'élaboration de cette biomasse par le jeu de variations concernant la compétition pour la lumière, l'eau, l'azote et le potassium (C5, C9, C10). Le schéma élaboré a pu être utilisé pour expliquer les variations intra et inter annuelles du rendement sur une période de 6 ans en Côte d'Ivoire, pouvant conduire à une gestion raisonnée du cycle de culture en relation avec les potentialités du milieu, en particulier les variations de rayonnement et de pluviosité (C10). Il a également servi de base aux travaux de modélisation conduits pour établir un modèle de culture sur la base des modèles présents dans la plateforme DSSAT²⁴. Les travaux concernent d'abord la phase végétative (C14, C17), comprenant l'analyse de l'interception du rayonnement solaire par le peuplement (AN5) puis l'ensemble du premier cycle, jusqu'à la récolte du fruit. Mon séjour post-doctoral à la faculté d'agronomie de l'University of Hawaii dans le laboratoire du professeur Bartholomew est l'occasion de confronter mes résultats acquis en Côte d'Ivoire aux résultats acquis par l'Université d'Hawaii²⁵, et d'établir les bases de ce modèle (C21, C29). Ce travail est réalisé en proximité du groupe du projet IBSNAT²⁶, alors basé sur le campus. Celui-ci développe alors la plateforme DSSAT, qui regroupe une famille de modèles du type CERES (Jones et Kiniry, 1986 ; Caldeira et Pinto, 1998, Van Ittersum et al., 2002). En termes fonctionnels, cette famille de modèles se structure autour d'un schéma dynamique de croissance du couvert végétal qui repose sur le principe de fonctionnement carboné des plantes formalisé dans SUCROS, modèle à l'origine de tous les modèles de culture (de Wit, 1978, Van Ittersum et al., 2002). Le rayonnement est intercepté par l'appareil photosynthétique (caractérisé par l'indice foliaire) et transformé en biomasse, elle même répartie entre les différents organes de la plante (racines, feuilles, organes reproducteurs, etc.). Cette répartition repose généralement sur des équilibres source-puits décrits par Warren-Wilson (1972). La transformation de l'énergie en biomasse repose sur un formalisme simple basé sur l'efficacité du rayonnement (Monteith, 1972), modulé par l'action de la température et par des indices de stress hydriques et azotés.

Dans ces modèles, le module de développement, piloté par la température, détermine et pilote le module de croissance et la répartition des assimilats en organisant tout au long du cycle de la plante la présence et la force des différents puits. Par ailleurs, c'est ce module qui simule les dates d'occurrence des étapes-clés du développement de la plante, comme les dates de détermination des différentes composantes du rendement. La date de récolte est l'un de ces événement-clé, qui marque la fin de l'accumulation de biomasse par le fruit et sa maturité : il a donc une importance stratégique lorsque l'on utilise le modèle à des fins de prédiction. La construction d'un modèle conceptuel de développement du fruit, basé sur l'accumulation de degrés-jours, et tenant compte des spécificités de la structure et de la physiologie de l'ananas (fruit exposé au soleil) et des conditions du milieu tropical (températures élevées, pour partie au delà de l'optimum thermique) est établi et validé sur une base de données mondiale, après mise en commun des données acquises par le Cirad, l'University of Hawaii et le CSIRO (Australie). Un outil informatique de simulation de la date de récolte, basé sur l'accumulation des sommes de température par le fruit, est ainsi élaboré (**A1**, C19). La figure 2 montre les variations de la durée entre l'induction florale et la récolte pour 9 ans de plantations mensuelles en Côte d'Ivoire (les parcelles ont été plantées tous les mois et les traitements d'induction florale ont été réalisés systématiquement 8 mois après la plantation). Le modèle permet de rendre compte de manière satisfaisante des variations intra et interannuelles liées au climat dans les conditions de Côte d'Ivoire. Son utilisation dans une gamme climatique plus large révèle sa robustesse : le modèle permet une

24 DSSAT : Decision Support System for Agrotechnology Transfer. <http://www.icasa.net/dssat/index.html>

25 l'Université d'Hawaii, en raison de l'importance économique de la culture de l'ananas pour l'île, constitue historiquement un lieu de recherche fécond sur cette culture, pour diverses disciplines (agronomie, biotechnologie, impacts environnementaux, etc.)

26 IBSNAT : International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. <http://www.icasa.net/dssat/ibsnat.html>

bonne prévision de la date de récolte dans les conditions variées de Côte d'Ivoire, Australie, Hawaii et Thaïlande (figure 3).

Toutes ces relations établies ont d'importantes applications pratiques par exemple pour la gestion de l'irrigation (identification des phases critiques), ou la planification des opérations culturales (applications d'engrais, dates optimales d'induction florale et de récolte, etc.). Un ensemble de relations et de modes opératoires applicables au champ et à la gestion des plantations sont établis (par exemple, méthodologies de prélèvement de feuilles indicatrices pour estimer la biomasse d'un peuplement). L'expertise scientifique acquise par près de 10 ans de recherches sur le fonctionnement de cette culture est valorisée à travers la publication de plusieurs importants articles de synthèse publiés dans des ouvrages de référence internationale sur le sujet (B1, B2, B3, B6, B7, B8).

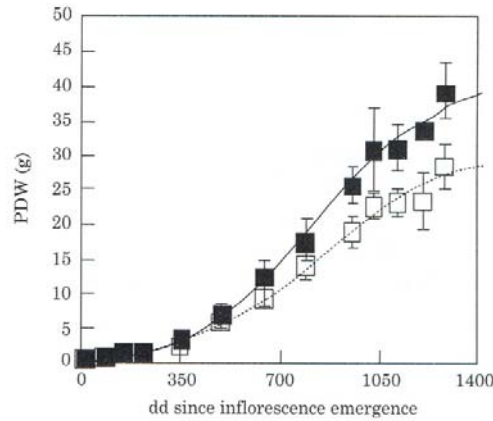
I.2. Développement et formation du fruit chez le bananier (*Musa spp.* AAA grande naine)

Monocotylédones semi-pérennes tropicales à multiplication végétative, fruits d'exportation souvent cultivés dans des contextes économiques et des milieux écologiques similaires, l'ananas et le bananier présentent de nombreux points communs, malgré leurs différences évidentes. C'est donc tout naturellement que les questions scientifiques s'élaborent avec une certaine proximité dans la petite communauté des chercheurs qui travaillent sur ces deux plantes. Les demandes qui émergent sur la qualité du fruit du bananier en relation avec l'élaboration du rendement de cette culture sont l'occasion d'approfondir ces rapprochements.

La production de bananes pour l'exportation est soumise à des contraintes de taille et de qualité des fruits. Pour être exportable des Antilles vers la métropole, un fruit doit présenter des caractéristiques minimales en terme de diamètre (30 mm), de longueur (17 cm) et de maturité à la récolte (estimée par la durée de vie verte ou DVV²⁷ qui doit excéder 20 jours). En conséquence, la forte variabilité de poids et de qualité des fruits observée au champ entraîne des pertes de rendement importantes pour les planteurs. Cette variabilité pondérale dépend des conditions de croissance mais également de la position des fruits sur le régime : les fruits de la partie distale du régime (mains du bas) sont 30 à 40% plus petits que ceux de la partie basale (mains du haut). L'étude conjointe du déterminisme du poids et de la qualité (maturité) du fruit à la récolte, est donc nécessaire pour optimiser le rendement quantitatif et qualitatif des bananiers. La thèse d'Alexandra Jullien (Jullien, 2000), que je co-dirigeais avec Bertrand Ney, a permis d'approfondir les aspects écophysiologiques liés à la qualité du fruit.

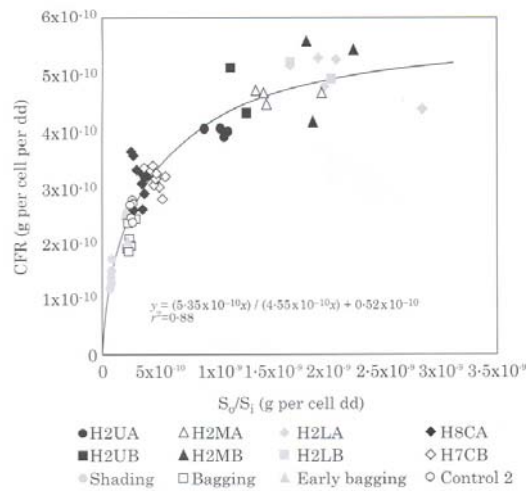
Dans un premier temps, les causes de la variabilité pondérale des fruits au sein du régime (inflorescence) ont été déterminées. Pour cela, une étude histologique du développement a été réalisée afin de déterminer la chronologie des phases de division cellulaire et de remplissage des cellules à l'échelle du fruit et du régime. A l'échelle du fruit, nous montrons que la phase de forte accumulation de matière sèche (remplissage) a lieu après la fin des divisions cellulaires dans le fruit. Au sein du régime, il y a un décalage de développement entre les mains basales (mains du haut initiées en premier) et les mains distales (mains du bas initiées en dernier) comme le montre la figure 4. Ce décalage a pour conséquence un nombre de cellules plus important dans les fruits des mains basales. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication originale (A2).

²⁷ Laps de temps écoulé à une température donnée entre la récolte et la crise climactérique



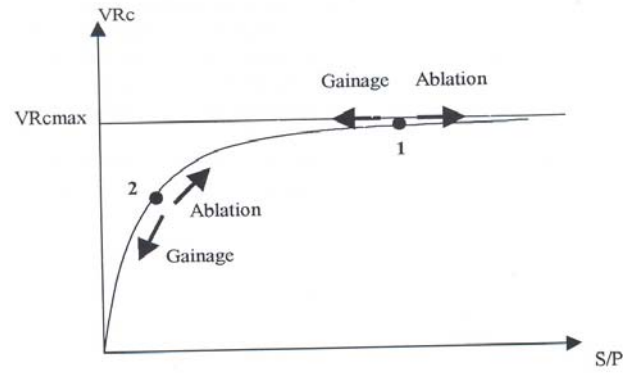
Time course of changes in pulp dry weight (PDW, NEUF1) in hand 1 (■) and hand 7 (□). The S-shaped curves of PDW changes are those of the fitted Gompertz equations: $y = M \exp[-\exp\{-a(x - b)\}]$ where M is the maximal value of y and b the abscissa at inflexion point. For hand 1: $M = 48$, $a = 0.0025$, $b = 753$. For hand 7: $M = 37$, $a = 0.0022$, $b = 771$. Points are the mean \pm s.e. of five fruits. dd, Degree days. Error bars represent standard deviation.

Figure 4 : Evolution du poids sec de pulpe chez la banane pour les mains 1 (main proximale, carré plein) et main 7 (main distale, carré vide) du régime en fonction du temps thermique (degrés-jours). **Extrait de A2.**



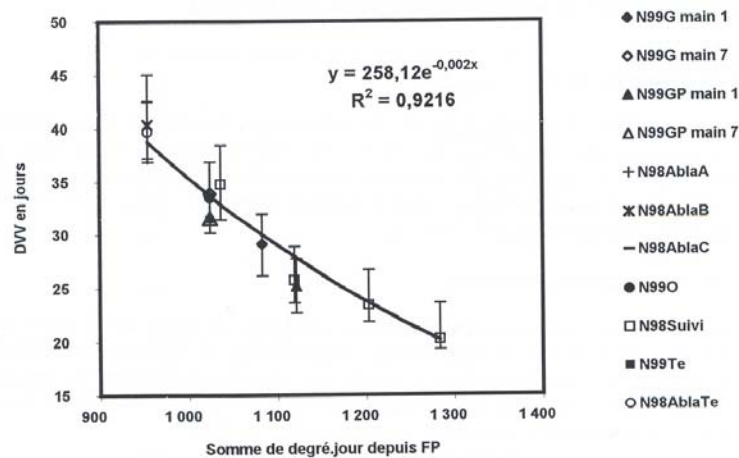
Relationship between cell filling rate (CFR) and source/sink ratio during bunch filling period (S_o/S_i). The line represents the Michaelis-Menten equation fitted to the data. dd, Degree-days.

Figure 5 : Taux de croissance de la cellule (grammes par cellule par degré-jour) en fonction du ratio source/puits durant la phase de remplissage. **Extrait de A3.**



Effet d'un gainage ou d'une ablation de mains pendant la phase de remplissage du régime en fonction du rapport source/puits initial. 1 : situation « puits limitant », 2 : situation « sources limitantes », VRc : vitesse de remplissage des cellules, VRcmax : vitesse de remplissage des cellules maximale, S/P : rapport sources/puits pendant le remplissage.

Figure 6 : D'après Jullien (2000)



Modèle exponentiel de calcul de la durée de vie verte (DVV en jours) en fonction de l'âge des fruits exprimé en somme de température depuis le stade fleur pointante (FP) sur les fruits des essais N98Suivi, N98Abla, N99O, N99G, N99GP et N99Te

Figure 7 : D'après A15

Dans un deuxième temps, des modifications du rapport source/puits ont été réalisées au moyen d'ombrage des feuilles (diminution des sources) ou par adaptation de techniques culturales couramment usitées telles que le gainage des régimes (augmentation de l'activité du puits) et l'ablation de mains (diminution de la taille du puits). Les résultats originaux obtenus à partir de ces expérimentations sont publiés (A3). Il est apparu que le nombre de cellules des fruits est un facteur déterminant de la variabilité pondérale au sein du régime (C33). En revanche, la vitesse de remplissage moyenne des cellules est identique pour tous les fruits du régime et déterminée par le rapport source/puits. Une relation de type Michaelis-Menten a été ajustée aux données et permet de relier la vitesse de remplissage moyenne des cellules d'un régime au rapport source/puits moyen pendant la période de remplissage (figure 5). Les fruits des traitements d'ablation correspondent aux rapports source-puits et aux vitesses de remplissage les plus élevés ; tandis que les traitements d'ombrage correspondent aux rapports source-puits et aux vitesses de remplissage les plus faibles. Les régimes des traitements témoins et gainés correspondent ont des rapports source-puits et vitesse de remplissage cellulaire intermédiaires. Ces résultats fournissent d'intéressants prolongements potentiels en matière d'application : dans le cas d'un rapport source-puits élevé et donc d'une vitesse de remplissage des cellules proche de sa valeur maximale (situation « puits limitant »), une ablation aura peu d'effet sur la vitesse de remplissage des cellules, sur la croissance en diamètre et finalement sur la date de récolte. En revanche, si le rapport source-puits est faible et qu'en conséquence la vitesse de remplissage des cellules est inférieure à sa valeur maximale (situation « sources limitantes »), l'ablation des mains aura un effet significatif sur la vitesse de remplissage des cellules, sur la croissance en diamètre et finalement sur la date de récolte (figure 6).

A partir des données histologiques recueillies dans ces essais, un schéma conceptuel du développement de l'inflorescence est proposé, dans lequel le développement précoce des organes et notamment la phase de mise en place du nombre de cellules conditionnent la force du puits de l'organe pendant son remplissage. Ce schéma a été mis en évidence chez d'autres cultures comme le blé (Brocklehurst, 1977), le pois et le soja (Munier-Jolain et Ney, 1999), le melon (Higashi et al., 1999), la tomate (Ho, 1984) et des arbres comme la pomme ou la pêche (Scorza et al., 1991). Mais alors que pour le pois ou le soja la vitesse de remplissage des organes reproducteurs après la phase de divisions cellulaires ne varie pas avec les conditions de croissance, les résultats obtenus et publiés avec A.Jullien (A3) montrent que chez le bananier la vitesse de remplissage des cellules varie avec le niveau des sources disponibles, comme c'est le cas chez d'autres espèces comme le concombre (Marcelis, 1993), la pomme ou la pêche (Grossman et Dejong, 1995).

Dans un troisième temps, ces connaissances ont été intégrées dans un modèle de répartition des assimilats au sein du régime qui simule le poids des fruits et des régimes à la récolte. Une relation reliant la DVV des fruits à leur âge exprimé en somme de température a été mise en évidence (figure 7) puis adjointe au modèle, lui conférant ainsi une valeur prédictive essentielle de la qualité de la récolte. Ces résultats, qui ont fait l'objet d'une communication à congrès (C36), et qui devraient être publiés prochainement (A15) présentent un double intérêt cognitif et prédictif. Le modèle ainsi construit permet de comprendre et de simuler le fonctionnement de la plante durant la phase de remplissage du régime, selon des connaissances histologiques nouvelles et des règles validées de répartition des assimilats. Il constitue également un outil pertinent de diagnostic du rendement et d'aide à la décision dans le choix de certaines interventions culturales telles que le gainage des régimes et l'ablation de mains ainsi que pour la détermination de dates de récolte optimales.

II. Analyser, représenter et modéliser le champ cultivé considéré comme un système hétérogène

Dans les travaux présentés dans le chapitre précédent, sur ananas comme sur bananier, le peuplement végétal a d'abord été considéré, représenté et modélisé comme un ensemble homogène composé de plantes supposées identiques. Par souci (souvent nécessaire) de simplification, une grande partie des méthodes et outils de l'agronomie sont en effet fondés sur cette hypothèse d'homogénéité du couvert. Peu étudiées sur ananas et bananier à l'exception d'une étude préliminaire (C2)²⁸, les questions liées à l'hétérogénéité du couvert se révèlent pourtant déterminantes pour la conduite de la culture et sa durabilité. Rentabilité économique et conduite de la culture dépendent en effet fortement de la maîtrise de l'hétérogénéité du peuplement, en particulier pour le bananier où la maîtrise de l'hétérogénéité intra-peuplement peut constituer une stratégie explicite de conduite pour le planteur. La prise en compte des questions environnementales dans le questionnement scientifique, la complexité des systèmes étudiés va progressivement nous conduire à prendre en compte l'hétérogénéité comme une variable explicite. La thèse de Philippe Tixier (Tixier, 2004), que j'ai dirigée en co-direction avec Jacques Wéry prend ainsi un point de vue nouveau sur le système bananier pour prendre en compte explicitement l'hétérogénéité du couvert induite par le comportement phénologique individuel de chaque entité plante au sein d'un peuplement monospécifique.

Les systèmes de culture plurispécifiques se caractérisent par de multiples interactions (compétition ou facilitation) pour le partage des ressources entre les espèces associées et entre les individus d'une même espèce. Ces interactions dépendent fortement de la structure et de l'hétérogénéité du couvert. Les systèmes multiespèces constituent donc un champ d'étude privilégié pour aborder l'hétérogénéité au sein des couverts. Dans les systèmes agroforestiers à base de cocotier du Vanuatu, les relations de compétition pour la lumière et pour l'espace sont apparues comme des éléments clés du fonctionnement et de l'évolution de ces systèmes (Lamanda, 2005). Leur connaissance devrait permettre en particulier de mieux raisonner et d'optimiser l'introduction de cultures associées avec le cocotier. Des outils spécifiques pour les caractériser sont développés dans le cadre de la thèse de Nathalie Lamanda (Lamanda, 2005) que j'encadrerai avec Philippe Martin sous la direction de Thierry Doré. Ces deux situations, qui seront abordées différemment, sont décrites ici successivement.

II.1. Modéliser un peuplement hétérogène de bananiers

La plupart des modèles de culture utilisés en agronomie pour simuler le développement et la croissance de peuplements végétaux reposent sur une hypothèse d'homogénéité du couvert. C'est le cas pour CERES (Jones et al., 2003), APSIM (Keating et al., 2003) ou STICS (Brisson et al., 1998), modèles parmi les plus couramment utilisés par les agronomes. Ils ne permettent pas la simulation de systèmes hétérogènes ou, plus précisément, ne permettent pas la simulation de processus émergents liés à la complexité de ces systèmes (désynchronisation des cycles, facilitation entre espèces, etc.). Le bananier constitue pour nous une plante modèle pour aborder l'hétérogénéité du couvert et les propriétés du système qui peuvent lui être associées. Le bananier est une plante herbacée qui se reproduit par voie végétative, chaque plante produisant une série de rejets latéraux de tige, selon une séquence qui peut

²⁸ Il s'agit ici d'une remarque de portée générale : la bibliographie sur ces 2 espèces porte quasi exclusivement sur des couverts considérés comme homogènes

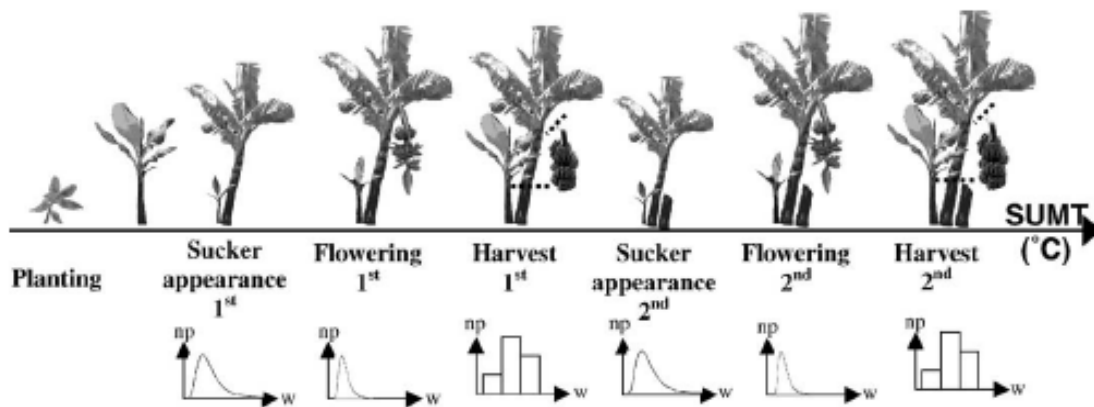
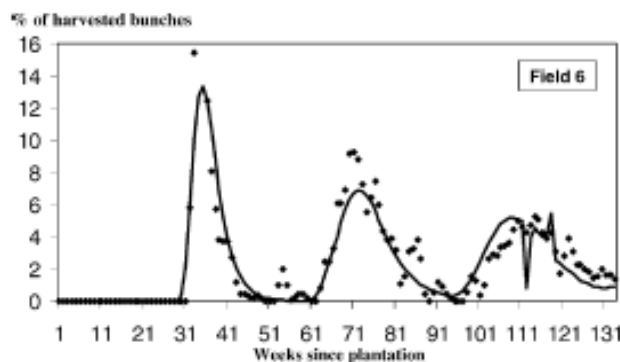


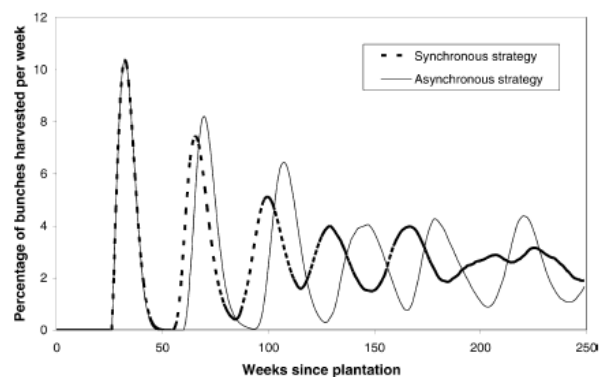
Figure 8 : Stades de développement du bananier en fonction de la somme de température et distributions statistiques associées exprimées en nombre de plantes par semaine pour deux cycles de culture. **Extrait de A4.**



Observed (◆) vs. simulated (—) harvest dynamics over time. Percentages (%) represent the ratio between the number of bunches harvested each week and the total banana crop population for field six (Martinique, F.W.I.; elevation: 315 m; cultivar: *Musa* spp., AAA group, cv. Cavendish Grande Naine).

Figure 9a : Dynamiques de récolte observées et simulées pour une parcelle en Martinique en fonction du nombre de semaines depuis la plantation. Les pourcentages représentent les ratios de plantes récoltées chaque semaine. **Extrait de A4.**

Figure 9b : Dynamiques de récolte simulées pour deux stratégies de sélection des rejets. Les deux stratégies de sélection conduisent à des rythmes de récolte maintenus à l'échelle parcellaire (stratégie synchrone) ou progressivement lissés (stratégie asynchrone). Les pourcentages représentent les ratios de plantes récoltées chaque semaine. **Extrait de A4.**



Percentage of bunches harvested per week relative to the initial number of plants: $(H_t/N_{1,1}) \times 100$; with H_t the total number of bunches harvested at step t and $N_{1,1}$ the number of planted plants in cohort 1 at step 1; simulated for two sucker selection strategies: "synchronous strategy" with late pruning (sucker appearance threshold BT is high) and narrow sucker selection rate curve of cohort 'i' at step 't' ($z_{i,t}$ is low) and "asynchronous strategy" with early pruning ('BT' is low) and broad selection curve ($z_{i,t}$ is high).

se répéter plus d'une cinquantaine de fois (Turner, 1994). Les principaux stades de développement comprennent l'apparition d'un rejet, la floraison et la récolte (Figure 8). Un peuplement de bananiers se compose donc d'un ensemble de plantes individuelles issues des différents propagules végétatifs apparus, plantes qui se développent à leur propre rythme, sans nécessairement suivre un cycle synchrone. A un instant donné, un peuplement de bananiers se compose donc d'un ensemble de plantes individuelles à des stades de développement variés. L'hétérogénéité dans la structure de la population est due à la fois à des phénomènes d'ordre physiologique (variabilité de la durée des phases de développement entre plantes) et à l'effet de certaines pratiques culturales (type de rejet sélectionné, moment de la sélection, remplacement des plantes disparues, etc.). A l'échelle du peuplement, la dynamique de récolte (que l'on assimile ici au nombre de régimes récoltés par semaine au cours du temps) dépend étroitement de la désynchronisation des cycles phénologiques entre les différentes plantes qui composent le peuplement. Les dynamiques de récolte sont caractérisées par des oscillations dont la fréquence et l'amplitude varient au cours du temps, en réponse au climat et aux pratiques culturales. Un exemple de dynamique de récolte est reporté sur la figure 9a, pour un champ observé en Martinique. Le planteur peut vouloir concentrer la récolte à une période de l'année (ce qui requiert une synchronisation des cycles individuels) ou au contraire étendre les récoltes tout au long de l'année (ce qui requiert une désynchronisation des cycles individuels). Le comportement à long terme du système doit donc être compris et simulé : la structure de la population dans un peuplement donné détermine la dynamique de récolte, et conditionne l'efficacité de nombreuses opérations culturales, comme le montre la figure 9b.

Le concept de cohorte constitue un outil approprié pour analyser les processus démographiques dans une population. Une cohorte peut être définie comme un ensemble d'individus définis par un même stade phénologique. Une chaîne de cohortes est un groupe de cohortes liées entre elles par des flux contrôlés par différents processus ou lois (physiologiques, stochastiques, etc.). Le concept de cohorte est utilisé en écologie pour simuler l'évolution de populations d'animaux qui comprennent plusieurs stades de développement mais il a été rarement utilisé pour représenter des systèmes végétaux. Nous l'avons utilisé pour représenter et simuler la dynamique de population d'un peuplement de bananier (figure 10). Les chaînes de cohortes permettent de simuler la succession des différents stades phénologiques du bananier (initiation des rejets, croissance, apparition de la fleur, récolte, mort de l'individu, etc.). Le modèle ainsi conçu prend aussi en compte certains facteurs environnementaux qui influent sur les processus considérés (comme la température) ainsi que l'effet de certaines pratiques culturales qui interagissent avec la gestion de la population de bananiers (choix et élimination de rejets par exemple). Ce modèle, intitulé SIMBA-POP, a été réalisé dans le cadre de la thèse de Philippe Tixier que j'encadrais, en utilisant la plateforme STELLA. Il fonctionne selon un pas de temps hebdomadaire et est structuré en 2 chaînes de cohortes liées qui représentent respectivement les individus avant et après floraison. Les variables du modèle sont représentées sur le tableau 1. Ce modèle de peuplement, qui constitue le module central du modèle SIMBA (voir le chapitre III.2. dans cette partie) fait l'objet d'une publication dans la revue *Ecological Modeling* (A4).

II.2. Caractériser l'hétérogénéité intrapeuplement chez le cocotier (*cocos nucifera* L.)

Dans les systèmes qui associent plusieurs espèces, les interactions entre plantes s'exercent à la fois dans le milieu aérien (bilan radiatif et encombrement de l'espace) et dans le milieu souterrain (eau, nutriments mais aussi encombrement de l'espace par les racines). Dans les systèmes agroforestiers en zone tropicale humide, les relations de compétition pour la lumière constituent un des principaux facteurs limitant la croissance et/ou la production des différentes espèces du peuplement (Nair, 1993 ; Bellow et Nair, 2003).

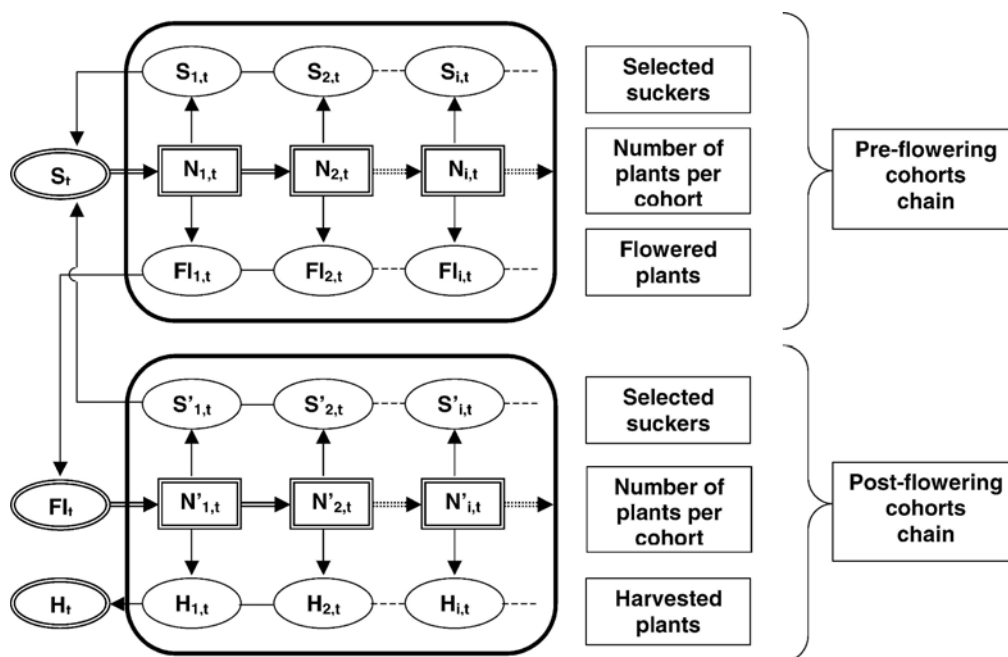


Figure 10 ... The cohort structure of SIMBA-POP (refer Table 1 for variable meaning).

Table 1
Variables used for SIMBA-POP simulation model

Input data	Definition
T_d	Daily average temperature of day, d ($^{\circ}\text{C}$)
Output variables	Definition
N_t	Total number of plants in the simulated field at step (t)
$H_{i,t}$	Total number of harvested plants in cohort (i) at step (t) (in the post-flowering chain)
H_t	Total number of harvested plants in the simulated field at step (t)
$D_{i,t}$ and $D'_{i,t}$	Total number of dead plants in cohort (i) at step (t)
D_t	Total number of dead plants in the simulated field at step (t)
$S_{i,t}$ and $S'_{i,t}$	Total number of suckers that appeared in cohort (i) at step (t)
S_t	Total number of suckers that appeared in the simulated field at step (t)
$FL_{i,t}$	Total number of plants that reached the flower stage in cohort (i) at step (t) (in pre-flowering chain)
FL_t	Total number of plants that reached the flower stage in the simulated field at step (t)
R_t	Total number of plants to replace
RR_t	Total number of plants replaced at step (t)
$SUMT_{i,t}$	Heat units accumulated by cohort (i) at step (t) (day-degrees)
$SUMT_t$	Efficient temperature at step (t) (day-degrees)
$s_{i,t}$	Sucker selection rate in cohort (i) at step (t)
$WS_{i,t}$	Week since 1st week of sucker appearance when $SUMT_{i,t} > \text{birth threshold}$
$R_{i,t}$	Flowering rate of cohort (i) at step (t)
$WF_{i,t}$	Week since 1st week of flowering when $SUMT_{i,t} > \text{flowering threshold}$
$WH_{i,t}$	Week since 1st week of harvest when $SUMT_{i,t} > \text{harvest threshold}$
DTT_d	Daily thermal temperature of day, d (day-degrees)

i is the number of the cohort in both pre-flowering and post-flowering chains; t the running step of the model in weeks; d the day of the simulated week.

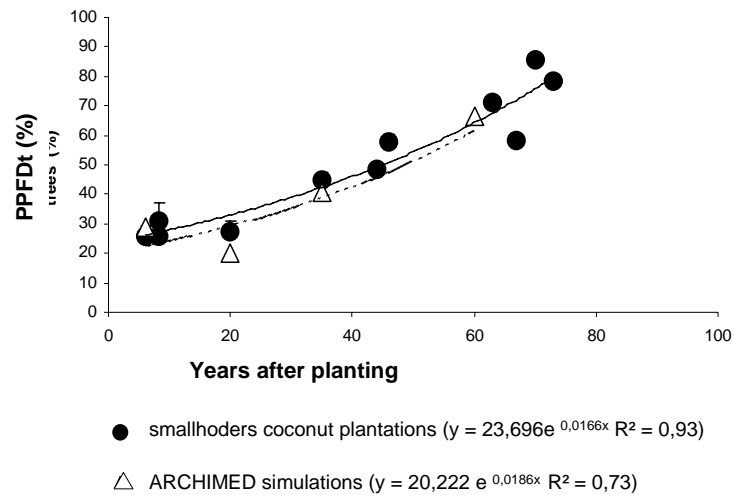


Figure 11 : Evolution du rayonnement photosynthétiquement actif transmis sous la strate formée par les cocotiers (PPFDt) en fonction du nombre d'années après plantation (YAP)

Après les dix premières années correspondant à la phase juvénile des cocotiers, *PPFDt* augmente régulièrement avec l'âge des cocotiers ; aux alentours de la 10^{ème} année, 30 % de *PPFDt* moyen est transmis sous le couvert, à la 45^{ème} année 50 % de *PPFDt* et après 60 ans le *PPFDt* atteint des valeurs de l'ordre de 65%.

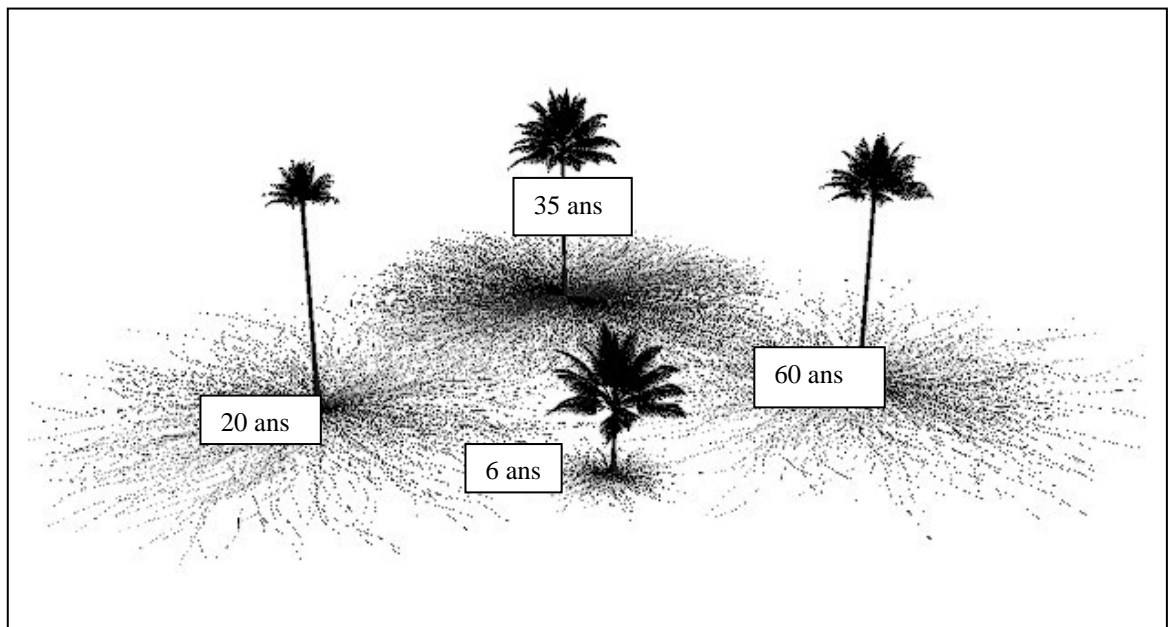


Figure 12 : Vue de profil des maquettes architecturales re-paramétrées pour les parties aériennes et souterraines des cocotiers Grand du Vanuatu (GVT) de 6, 20, 35 et 60 ans dans les conditions du Vanuatu.

Mais dans ces systèmes, les compétitions souterraines sont souvent plus importantes que celles qui s'exercent en surface (Rao et al., 1998 ; Huxley, 1999). Du fait des difficultés d'observation, les interactions souterraines ont d'une manière générale été peu étudiées et le niveau actuel de compréhension de ces interactions reste limité (Rao et al., 1993). Dans ce contexte, c'est **l'hétérogénéité du système** qui gouverne les opportunités de combinaison de plantes. Pour améliorer les performances des associations de culture sur les parcelles paysannes complantées en cocotier, on a donc cherché à savoir à quel moment du cycle et à quel endroit sur la parcelle, les conditions du milieu sont compatibles avec la pratique de cultures intercalaires en fonction de valeurs seuil (i) du taux de transmission du rayonnement incident et (ii) du taux d'occupation des horizons superficiels de sol par les racines de cocotiers.

Une démarche de modélisation, basée sur la construction de maquettes architecturales 3D, a ainsi été mise en œuvre afin de caractériser l'évolution spatio-temporelle i) du Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PPFD = PAR Photon Flux Density) transmis sous la strate formée par les cocotiers et, ii) de la densité des racines primaires (RI) de cocotiers ; deux facteurs déterminants pour les cultures intercalaires. La répartition du rayonnement transmis sous cocoteraie (PPFDt) et la répartition et la densité des RI ont été simulées à partir de représentations architecturales 3D de cocotiers. La répartition du rayonnement transmis sous cocoteraie (PPFDt) a été simulée sur des représentations architecturales 3D de cocotiers avec les modules MIR et MUSC de la plate-forme de simulation Archimed (Dauzat et Eroy, 1997; Dauzat et al., 2001 ; Mialet et al., 2001). La répartition des racines primaires de cocotiers a été simulée au moyen du modèle RACINE-cocotier (dérivé du modèle RACINE développé par Jourdan et Rey, 1997). Les deux modèles ont été testés sur une chronoséquence de parcelles représentant le développement des cocotiers en plantations paysannes. Dans un deuxième temps, des expériences de simulation ont été effectuées pour évaluer les possibilités de pratique de cultures intercalaires en fonction des l'âge de la cocoteraie.

II.2.1. L'évolution moyenne du rayonnement transmis par le couvert en plantations paysannes

Onze parcelles paysannes ont été sélectionnées sur le plateau de l'île de Malo au Vanuatu. Elles constituent une chronoséquence qui représente le développement des cocotiers compris entre 6 et 70 ans après plantation. Le PPFDt estimé à partir des photos hémisphériques évolue suivant une relation exponentielle au cours du développement des cocotiers sur les plantations paysannes ($r^2 = 0.93$, figure 11). Les valeurs moyennes de PPFDt obtenues par simulation à partir des maquettes architecturales paramétrées pour des plantations âgées de 6, 20, 35 et 60 ans correspondent à une tendance d'évolution du PPFDt cohérente avec l'évolution caractérisée sur les plantations paysannes. Ces valeurs moyennes de PPFDt recouvrent toutefois une hétérogénéité de la répartition du rayonnement liée à la structure macro (dispositif de plantation) et micro (architecture des individus) du peuplement à laquelle il est important d'accéder pour envisager les possibilités d'associer des cultures sous le couvert de cocotiers.

II.2.2. La répartition intra-parcellaire du rayonnement transmis au cours du développement des cocotiers

Au cours du développement des cocotiers, la hauteur du stipe augmente et l'architecture de la couronne foliaire se modifie (diminution du nombre et de la longueur des palmes, diminution de la longueur maximale des folioles sur les palmes et diminution du rapport pétiole sur longueur des palmes) (figure 12). Le pourcentage de recouvrement du sol par les couronnes foliaires (correspondant à l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif par les cocotiers et estimé via la pénétration

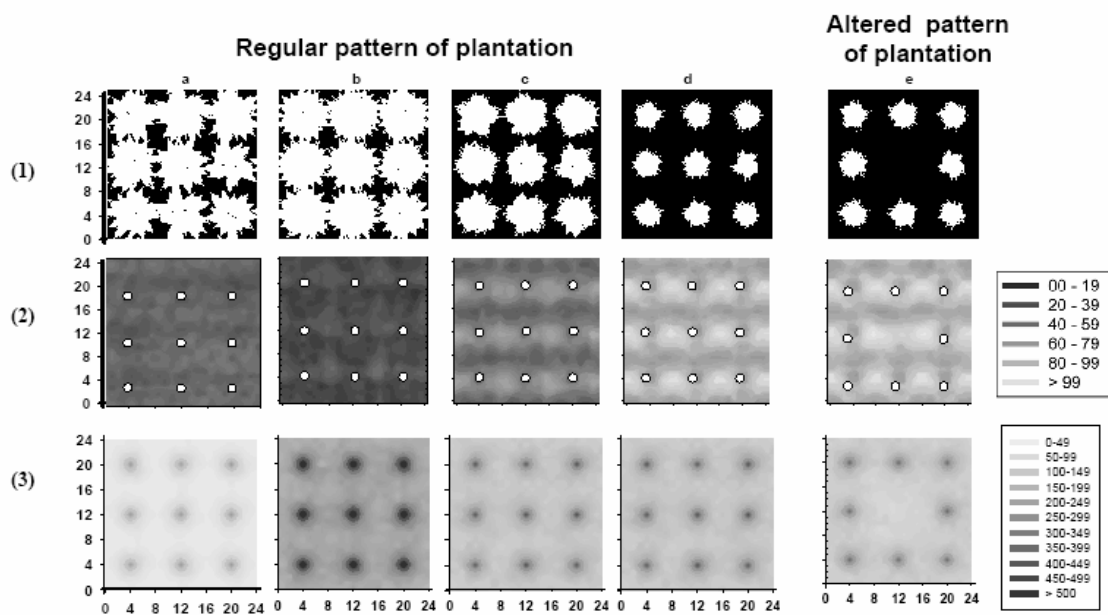


Figure 13 : Evolution (1) du recouvrement du sol par les couronnes des cocotiers GVT, (2) de la répartition du PARt et (3) du NIRP au cours du développement des cocotiers (a= 06 ans, b= 20 ans, c= 35 ans, d et e =60 ans) plantés avec un dispositif carré de 8m de côté complet (a,b,c,d) ou altéré (e).

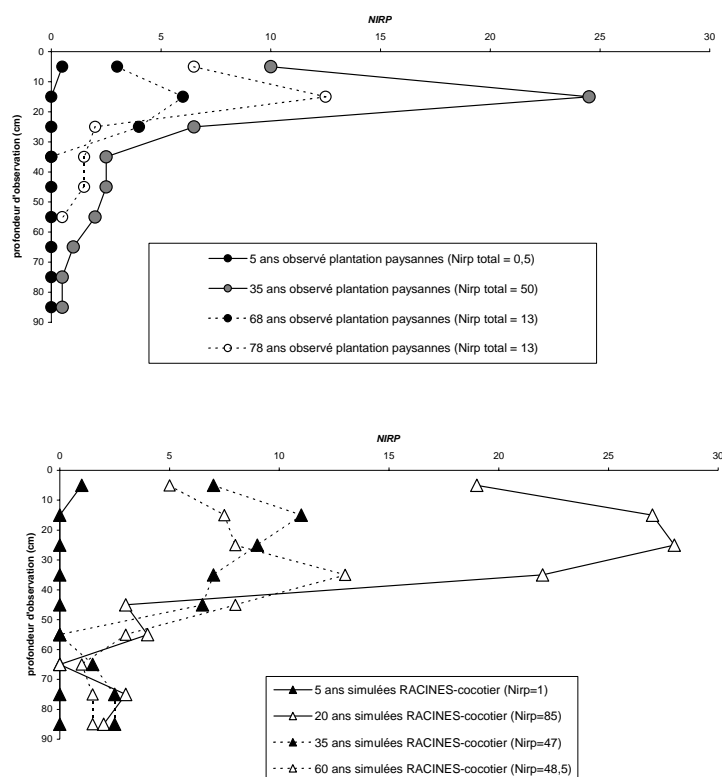


Figure 14 : Evolution du nombre d'impacts de racines de cocotier (NIRP) au cours du développement des cocotiers (a) NIRP mesuré sur les parcelles paysannes et (b) simulé avec le modèle RACINE-cocotier. NIRP = Nombre impact de racines primaires dénombrées sur la grille de 1*0.9m, positionnée au milieu de l'interligne ($\approx 4\text{m}$ de la base des cocotiers).

de ce rayonnement à la verticale du couvert) évolue en conséquence, passant ainsi de 66 % à 6 ans à 73 % 20 ans après la plantation des cocotiers, puis diminue et représente 48% de la surface de la scène 35 ans après la plantation pour finalement atteindre des valeurs de l'ordre de 20% 60 ans après la plantation (figure 13-1). Trente cinq ans après la plantation, PPFDt atteint une valeur moyenne de 40% mais sa répartition est hétérogène. On distingue alors des zones, situées entre les cocotiers (dont la surface totale correspond à 47% de la surface de la scène), où PPFDt est égal ou supérieur à 40% et qui conviendrait pour le développement d'espèces d'ombrage. En revanche, sur le reste de la scène, PPFDt est inférieur à 40%. L'évolution de l'architecture des cocotiers au cours de leur développement permet d'expliquer la répartition du PPFDt : l'envergure de la couronne (via la diminution de la longueur des palmes) diminue avec l'âge des cocotiers ce qui permet une meilleure transmission du PPFDt sous le couvert. A 60 ans, PPFDt atteint une valeur moyenne de 65% et sa répartition est moins hétérogène ; les arbres étant plus grands, le déplacement des ombres au sol au cours de la journée tendrait à homogénéiser la répartition du PPFDt. Il est alors possible de distinguer 2 zones : (1) entre les lignes de cocotiers, PPFDt est de l'ordre de 60%, convenant d'après Bellow et Nair (2003) pour le développement des espèces d'ombrages et (2) entre les cocotiers où PPFDt est de l'ordre de 80%. Notons qu'au centre de cette zone qui conviendrait pour le développement d'espèces héliophiles, la quasi-totalité du PPFD arrive au sol (PPFDt >80%) (figure 13-2, a,b,c,d).

Lorsque le dispositif de plantation est altéré par la disparition d'un individu, la valeur moyenne du PPFDt augmente, le PPFDt est alors supérieur à 60% sur 90% de la surface totale de la scène soit +15% par rapport au dispositif non altéré. Par ailleurs, PPFDt est plus homogène (la variance du PPFDt sur la scène avec un dispositif altéré est de 60% contre 68% avec un dispositif complet) et sa répartition est modifiée (figure 13-2e). Les limites des zones établies pour le dispositif régulier sont modifiées (figure 13-2d) ; la zone d'éclairement maximal (zone 3 : PPFDt > 80%) s'agrandit de +4% correspondant à des surfaces élémentaires comprises entre les deux cocotiers adjacents au cocotier manquant.

II.2.3. La colonisation de l'interligne par les racines primaires (RI) de cocotiers

L'encombrement du sol par les racines de cocotiers a été caractérisé à partir du comptage des impacts de RI sur profil de sol vertical situé au milieu de l'interligne (NIRP)²⁹. Le nombre de RI a été sélectionné comme indicateur du niveau d'occupation de l'espace, tout en sachant que les RI ne renseignent pas sur les niveaux de compétition pour le prélèvement de l'eau et éléments minéraux (ces fonctions sont assurées par des racines fines). Ces mesures ont été réalisées par Nathalie Lamanda dans le cadre de sa thèse sur 4 parcelles parmi les 11 sélectionnées précédemment (parcelles âgées de 5, 8, 35 et 68 ans).

L'essentiel des RI de cocotiers se retrouve dans les 40 premiers cm de sol et ce quel que soit le stade de développement des cocotiers (figure 14). La colonisation de l'interligne par les racines primaires de cocotiers ne commence pas avant la sixième année après la plantation des cocotiers : on dénombre une seule racine primaire au milieu de l'interligne de plantations paysannes de 6 ans (figure 14-a). La colonisation de l'interligne évolue au cours du développement des cocotiers, elle semble maximale en conditions paysannes aux alentours de la 35ème année après la plantation des cocotiers, puis diminue. Le NIRP passe de 50 à 35 ans après la plantation des cocotiers, à 13 pour 68 et 78 années après la plantation des cocotiers. L'absence de racines sous 60 cm de profondeur pour les plantations paysannes de 68 et 78 années s'explique par une plus faible profondeur de sol sur ces parcelles que sur les parcelles représentant les stades de développement antérieurs des cocotiers. Globalement, on retrouve le même type de profil racinaire à partir des données mesurées sur les plantations paysannes

²⁹ NIRP correspond à la moyenne du nombre d'impact de RI de cocotiers comptés à l'aide d'une grille dont les dimensions sont 0.9 m de profondeur sur 1 m de large avec une maille de 10 x 20 cm. Une fosse de 1m³ est creusée au milieu de l'interligne, la grille de mesure est successivement positionnée sur chacune des 2 parois verticales contiguës de la fosse (quelle que soit l'orientation) et les RI de cocotiers y sont dénombrées

que par simulation avec le modèle RACINE-cocotier (figure 14-b). La simulation des plantations âgées de 20 ans montre une colonisation racinaire maximale dans l'interligne, dans les 40 premiers centimètres, encore plus importante que dans les observations des plantations âgées de 35 ans.

Six années après la plantation des cocotiers, les RI n'atteignent pas l'interligne (figure 13-3a). La colonisation de l'interligne par les RI de cocotiers semble maximale 20 ans après la plantation selon le modèle. Elle diminue ensuite, le réseau de RI dans l'interligne apparaissant moins dense à 35 ans et à 60 ans après la plantation (figure 13-3). A partir de la 20ème année après la plantation des cocotiers, on observe un enchevêtrement des RI horizontales des cocotiers et ce sur l'ensemble de la scène simulée (figure 13-3). Les impacts de RI sur une grille virtuelle positionnée au milieu de l'interligne n'occupent proportionnellement qu'une très faible partie de l'espace, et ce quel que soit le stade de développement des cocotiers : à 6 ans = 0.1 RI/dm², à 20 ans = 10.8 RI/dm², à 35 ans = 4.7 RI/dm² et à 60 ans = 4.85 RI/dm².

L'altération du motif de plantation ne semble pas avoir de conséquence significative sur l'encombrement du sol par les RI de cocotiers. Si le nombre d'impacts de RI de cocotiers (NIRP) au milieu de l'interligne diminue avec l'altération du motif de plantation (de 48.5 NIRP avec le dispositif complet, on passe à 39.5 NIRP avec le dispositif altéré), l'encombrement de l'espace souterrain semble toujours important (figure 13-3 e et d), l'espace libéré par la mortalité du système racinaire du cocotier manquant serait rapidement colonisé par les cocotiers adjacents. Les observations de terrain vont dans le sens de cette hypothèse qui reste à démontrer.

II.2.4. L'évaluation des états du milieu sous cocotiers et le rôle des modèles : Conclusion

En offrant la possibilité de représenter en 3D les plantes et de simuler des dispositifs de plantations variés, voir d'associer sur la même scène des cocotiers à des stades de développement différents, les modèles 3D permettent de réaliser facilement des expériences virtuelles, qui nécessiteraient autrement des dispositifs lourds et très coûteux (de Reffye et al., 1995). Il est par ailleurs très aisé de combiner (ou plus exactement de juxtaposer) les sorties des modèles ARCHIMED et RACINE-cocotier, ce qui permet alors de prendre en compte, simultanément, la répartition des contraintes aériennes (PPFDt) et souterraines (NIRP). A partir du calibrage des maquettes architecturales pour la variété de cocotier GVT pour les stades 6, 20, 35 et 60 ans (figure 12). Il a ainsi été possible de rendre compte à la fois de la répartition du PPFDt et de NIRP et ce sur la totalité du cycle de culture des cocotiers de la variété GVT dans les conditions du Vanuatu. Ces résultats ont été publiés (A11). Les simulations obtenues avec les modèles ARCHIMED et RACINE-cocotier sont aisément combinables et permettent de quantifier et de localiser les contraintes aériennes (PPFDt) et souterraines (NIRP) au cours du développement des cocotiers.

Ces modèles, validés dans diverses situations, constituent ainsi un outil de conception des systèmes de culture à intégrer dans une expertise agronomique locale pour (i) appréhender le fonctionnement agroécologique de systèmes de culture à base de cocotiers, et (ii) sélectionner les espèces à associer et leur emplacement optimal sur les parcelles. Ils possèdent un fort potentiel pour recommander, en s'appuyant sur des expérimentations virtuelles, de nouvelles techniques culturales visant à minimiser les contraintes aériennes et souterraines. Il serait ainsi possible d'évaluer l'effet d'interventions telles que l'élagage de palmes basses ou l'éclaircissage de la cocoteraie. Une des applications les plus intéressantes concerne le choix des motifs et densités de plantation appropriés pour des associations culturales données. Cette problématique se pose plus particulièrement pour les cultures pérennes telles que le cacaoyer dont les performances doivent pouvoir être évaluées sur plusieurs décennies. Enfin, la simulation d'indicateurs spatialisés des contraintes aériennes (PPFDt) et souterraines (NIRP) pourrait

être intégrées à partir d'un ensemble de paramètres architecturaux simples à mesurer dans la conception/paramétrisation d'un modèle de culture permettant de prévoir l'effet des pratiques sur le fonctionnement agroécologique de plantations de cocotiers dans des conditions pédo-climatiques données.

II.3. Conclusion

Modèle dynamique dans le cas du bananier, modèle 3D dans le cas du cocotier, dans les 2 cas l'hypothèse d'homogénéité du couvert n'a pu être retenue pour aborder le fonctionnement des systèmes. Bien que mobilisant des outils et des modèles différents, ces deux exemples ont montré la nécessité de tenir compte et de rendre compte de l'hétérogénéité intraparcellaire pour expliquer les propriétés particulières de systèmes hétérogènes qu'ils soient mono (cas du bananier) ou plurispécifiques (cas du cocotier). Cette conclusion nous oblige à envisager différemment les outils disponibles pour évaluer et concevoir des systèmes de culture. Comment évaluer et concevoir des systèmes de culture en tenant compte des propriétés potentielles consécutives à leur hétérogénéité ? Quelles sont les limites des outils existants en agronomie ? Ces questions seront abordées dans le chapitre suivant et constitueront le point de départ du projet de recherche qui sera développé dans la troisième partie de ce mémoire.

III. Evaluer et concevoir des systèmes de culture durables.

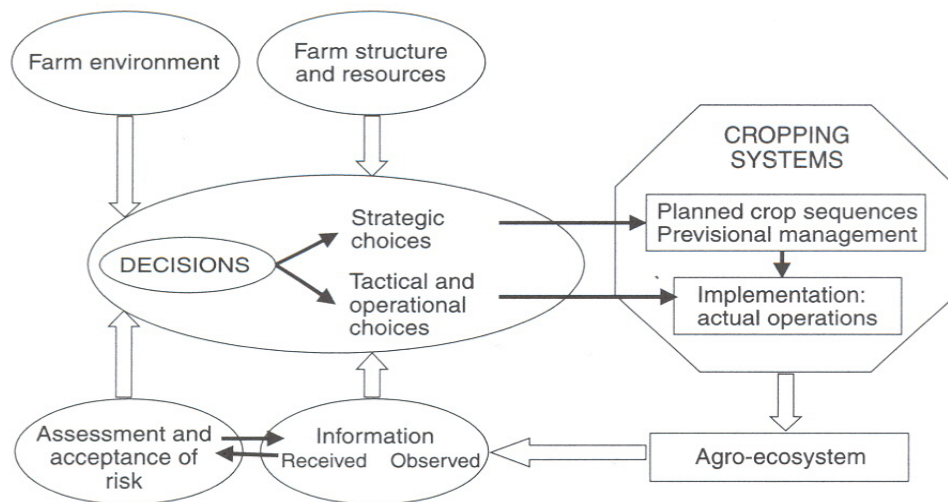
III.1. L'évolution du contexte scientifique

Concevoir des systèmes de culture performants, écologiquement et socialement acceptables impose de considérer le système de culture comme un système piloté (Cros et al., 2002) résultant de la combinaison de deux sous-systèmes ³⁰ :

- un « écosystème piloté », c'est-à-dire un ensemble d'éléments physiques et biologiques en interaction et distribués dans l'espace ; ce système est piloté par un acteur (au sens défini par Cros et al., 2002) et soumis à divers aléas (climat, bioagresseurs, etc.);
- un « système technique » c'est à dire un ensemble cohérent, organisé dans le temps et dans l'espace, d'opérations techniques appliquées au champ cultivé (succession culturale, association de cultures, itinéraire technique) dépendant du système de décision d'un agriculteur (Papy, 2002).

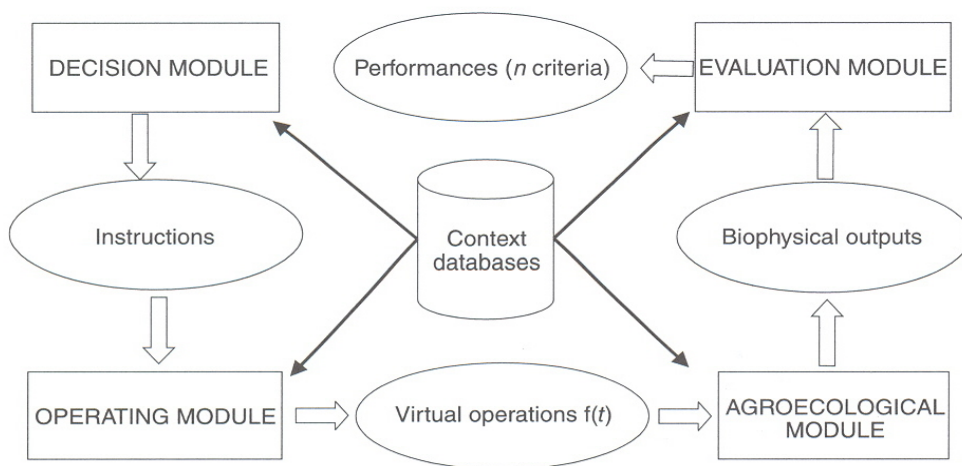
La prise en compte des deux sous-systèmes (biophysique et technique) est indispensable pour aborder à la fois la durabilité environnementale et faire le lien avec les systèmes englobants au sein desquels se décline la durabilité sociale et économique (notamment l'exploitation agricole). En effet, l'évolution du contexte agricole au Nord comme au Sud nécessite aujourd'hui une prise en compte rapide par l'agriculteur d'un ensemble de variables socio-économiques, environnementales et technologiques pour faire évoluer ses systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole.

³⁰ Présentation en cohérence avec le Projet Scientifique de l'UMR SYSTEM



The coupling of decision making and cropping systems.

Figure 15 : Schéma conceptuel du couplage entre règles de décision et itinéraire technique dans les systèmes de culture. **Extrait de B5.**



General structure of decision support systems for farming and cropping systems.

Figure 16 : Structure générale d'un système d'aide à la décision pour les systèmes de culture. **Extrait de B5.**

Bien souvent, la méthode essai-erreur qui a longtemps guidé la démarche des agronomes pour faire évoluer ces systèmes est devenu insuffisamment efficace, dans un contexte où l'environnement économique de l'exploitation évolue très vite et où l'accès à l'information économique et technologique est cruciale. Ces différents aspects sont abordés à l'occasion d'une communication invitée au congrès de l'European Society of Agronomy à Hambourg (2000). Les traits saillants de l'évolution des systèmes de culture aujourd'hui et les conséquences pour les recherches sur les systèmes de culture sont analysés (B5). Le rôle et la place des processus décisionnels dans le fonctionnement des systèmes de culture constitue en particulier un élément déterminant : la figure 15 rend compte de ces relations et du couplage étroit entre processus décisionnels et fonctionnement de l'agrosystème. Ce contexte a d'importantes répercussions sur les méthodologies d'évaluation et de conception des systèmes de culture. L'évaluation et la conception de systèmes de culture innovants passe ainsi aujourd'hui de plus en plus par l'utilisation de systèmes d'aide à la décision qui incluent à la fois des modules décisionnels (règles de décision de l'agriculteur) et des modules biophysiques (processus biophysiques). La structure générale de ces systèmes d'aide à la décision, reproduite sur la figure 16, comprend une chaîne de 4 composantes : la première composante consiste en un module décisionnel qui donne des instructions à un second module opérationnel, qui définit l'implémentation des opérations techniques dans le système. Le troisième module consiste en un modèle agroécologique qui décrit la réponse du système sol-plante à ces opérations techniques, simule le rendement et les différentes sorties biophysiques. La dernière composante consiste en un module d'évaluation qui convertit ces sorties en performances agronomiques, économiques ou environnementales.

L'objectif global que nous avons choisi³¹ est d'élaborer des connaissances, des modèles et, dans certains cas, des outils d'aide à la décision permettant de **concevoir des systèmes de culture répondant à une série de contraintes et d'opportunités** de différentes natures (agronomiques, écologiques, économiques, organisationnelles). Ces outils doivent permettre d'agencer et de classer, voire d'optimiser des systèmes de culture sur plusieurs types de critères (Alocija et Ritchie, 1993; Dogliotti et al., 2005) :

- **les performances agronomiques** : rendement, qualité des produits, régularité de la production, fertilité des sols ;
- **les impacts environnementaux** : érosion des sols, lixiviation du nitrate, pollution des eaux, des sols et de l'air par les produits phytosanitaires (ces critères n'ont pas été abordés pour le moment qu'à l'échelle de la parcelle et à l'aide d'indicateurs traduisant un risque de pollution ou d'érosion) ;
- **la cohérence avec les projets, objectifs et modèles de décision de l'agriculteur** : temps de travail, marge, compatibilité avec les autres caractéristiques de l'exploitation.

Tous ces critères ne peuvent pas être pris en compte dans chaque cas mais nous posons comme principe de base qu'un système de culture ne peut pas être considéré comme innovant, opérationnel et contribuant à la durabilité de l'agriculture s'il ne prend pas explicitement en compte ces différents aspects. Mes questions de recherche portent alors sur la réalisation et l'articulation de la modélisation des systèmes biophysiques, des systèmes de décision et des critères d'évaluation à partir de connaissances scientifiques et de savoir experts (c'est-à-dire d'informations quantitatives et qualitatives) pour explorer des gammes de systèmes de culture innovants et mesurer de façon multicritère leur distance à un cahier des charges.

³¹ objectif qui correspond aujourd'hui à celui de l'axe 1 de l'UMR SYSTEM, animé par Christian Gary

L'ambition qui sera conduite dans l'unité sera d'utiliser et de contribuer à développer les diverses méthodologies de conception de systèmes de culture proposées récemment (Boiffin et al., 2001 ; Meynard et al., 2001), chacune d'entre elles étant appliquée, dans un premier temps, au système de culture le plus favorable à son développement en fonction des objectifs, des moyens et des partenaires du programme. **Trois voies méthodologiques** de la conception des systèmes de culture (Loyce et Wéry, 2006) sont ainsi explorées dans l'unité :

- diagnostic agronomique et prototypage d'itinéraires techniques à partir du savoir d'experts et d'expérimentation (appliqué au cas du cotonnier) ;
- conception de systèmes de culture innovants sur la base de modèles de simulation (appliquée sur bananier et vigne) ;
- formalisation et évaluation de modèles de décision (appliquée sur vigne).

Je me suis consacré dans ce programme au cas du bananier pour lequel nous avons développé dans le cadre de la thèse de Philippe Tixier³² une méthodologie de conception basée sur la mise au point d'un nouveau modèle : le modèle SIMBA.

La conception de systèmes de culture assistée par modèle est basée sur le développement de modèles associant règles de décision et fonctionnement du système biophysique. On simule le fonctionnement de cet ensemble, en faisant varier plusieurs facteurs et en étudiant leurs interactions. L'optimisation porte ici plus sur les paramètres des règles de décision que sur ceux du modèle biophysique (ce dernier ayant été paramétré et validé au préalable). Elle débouche en général sur une expérimentation système : la solution optimale, au vu des différents critères de performance, d'impact et de cohérence, est traduite en règles de décision puis expérimentée dans les conditions agricoles. Cette approche a été explorée dans le cas des systèmes bananiers aux Antilles pour lesquels les connaissances et modèles disponibles permettaient de concevoir un modèle prenant en compte les principales techniques, les principaux processus et les principaux critères d'évaluation.

III.2. De nouveaux outils de modélisation pour la conception de systèmes de culture durables : le cas des systèmes bananiers aux Antilles

III.2.1. Introduction

Aujourd'hui, au delà des aspects liés à la qualité, la culture bananière aux Antilles est confrontée à d'importants problèmes agronomiques (rendements faibles à cause du développement important de pathogènes), environnementaux (transport de pesticides et de sol vers les eaux de surface, dans un contexte écologique insulaire fragile) et économiques (variation du prix de vente des fruits et coût de la main d'œuvre élevé) susceptibles de remettre en cause la pérennité de la filière. Les agronomes sont donc confrontés à des problèmes qui mobilisent différentes disciplines, leur résolution nécessitant souvent une approche globale du système de culture (qui englobe à la fois des aspects environnementaux et agronomiques par exemple).

³² P. Tixier (2004). Thèse que je dirige en co-encadrement avec J. Wéry

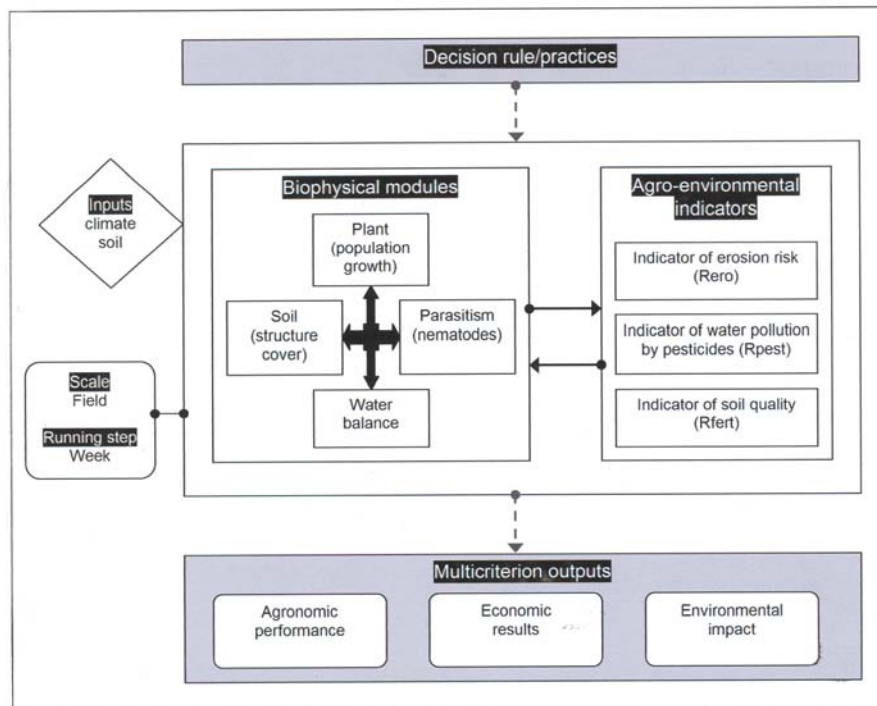


Figure 17 : Structure du modèle SIMBA (d'après A7).

Dans ce contexte, des systèmes de culture innovants répondant à un nouveau cahier des charges économique et environnemental doivent être mis au point. Plusieurs voies sont explorées par la recherche qui, au delà d'un mode de conduite raisonné, visent à augmenter la diversité biologique dans ces systèmes de monoculture, à travers l'intégration de jachères, de rotations ou de plantes associées. Ces différentes voies, qui font aujourd'hui l'objet de recherches au Cirad comme à l'INRA en Guadeloupe et en Martinique, sont présentées lors d'une communication orale au congrès de l'ESA à Copenhague (C50). Leur potentialité d'adoption par les agriculteurs pose néanmoins de nombreuses questions, qui dépassent largement l'ensemble des éléments techniques du système de culture. Ces différents aspects ont fait l'objet d'une réflexion pluridisciplinaire en collaboration avec des agroéconomistes et géographes, réflexion qui a fait l'objet de publications (AN10, C51), abordant aussi la question de la coordination d'un ensemble de règles de décision sur un espace composé d'un ensemble de parcelles.

Pour les agronomes, l'évaluation et la conception de systèmes de culture innovants nécessitent la mise au point de nouvelles méthodologies. Des modèles ont été créés qui constituent des outils d'exploration de la pertinence de nouveaux systèmes (Rossing et al., 1997; Dogliotti et al., 2003). Certains, comme le modèle BETHA (Loyce et al., 2006) permettent de générer, évaluer et trier des systèmes de culture (ici, à base de blé éthanol). Dans le cas des systèmes de culture à base de bananiers la conception de systèmes innovants implique la prise en compte de différents processus comme la structure du peuplement et son hétérogénéité, le parasitisme ou certaines caractéristiques du sol. La prise en compte de l'évolution du peuplement de bananier et la contrainte parasitaire sont en effet deux éléments clés et en interaction dans la simulation à long terme des systèmes de culture bananiers. Un modèle spécifique, qui rend compte de ces caractéristiques particulières du système, et qui va au delà des outils réalisés antérieurement ou disponibles par ailleurs, a été conçu pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture bananiers. Ce modèle (appelé SIMBA) a été développé dans le cadre de la thèse de Philippe Tixier (Tixier, 2004).

III.2.2. Le modèle SIMBA

III.2.2.1. Structure du modèle

A l'instar des modèles décrits précédemment, SIMBA comprend un module décisionnel, un module biophysique et un module d'évaluation (figure 17). Le module biophysique de SIMBA simule, entre autres variables, la croissance des bananiers et leur productivité (biomasse aérienne et racinaire, rendement), la dynamique parasitaire (nématodes telluriques), la structure du sol, la couverture du sol et le bilan hydrique.

Le module biophysique de SIMBA repose sur certaines caractéristiques essentielles de la culture du bananier, en particulier l'hétérogénéité du peuplement (assimilée ici au décalage phénologique entre individus) et la composante parasitaire (en particulier les nématodes), deux éléments en interaction, déterminants pour la durabilité de la culture. Ces deux éléments le différencient notablement des modèles de culture classiques développés par ailleurs. SIMBA simule ainsi l'évolution de la structure du peuplement de bananiers au cours des cycles de culture (cf. II.1), point clé qui conditionne l'ensemble de la dynamique du système. Comme nous l'avons vu, cette dynamique repose sur une représentation nouvelle du peuplement : chaque plante est représentée comme une entité individuelle qui se développe à son rythme propre; le peuplement est constitué d'un ensemble de cohortes en évolution dynamique. Cette représentation, qui constitue une rupture par rapport aux modèles de culture classiques qui considèrent le peuplement comme un ensemble de plantes identiques (C38), permet de

rendre compte de la dynamique de récolte en culture bananière, dynamique qui résulte directement du décalage de cycle entre les bananiers d'une parcelle donnée. Il simule ainsi l'évolution de l'hétérogénéité intra-parcellaire au cours du temps, hétérogénéité qui dépend pour partie de la stratégie de gestion des rejets appliquée par l'agriculteur, comme nous avons pu le voir sur la figure 9b. Cette dynamique a des répercussions importantes sur la dynamique des bioagresseurs, conditionnant ainsi les pratiques phytosanitaires et les risques associés.

III.2.2.2. Une première tentative pour évaluer le risque sanitaire

La pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites est centrale dans la problématique agronomique et environnementale dans les systèmes bananiers des Antilles (AN10). Elle a également des conséquences, via l'emploi des nématicides, sur le taux de résidu potentiel de pesticide dans le fruit et donc sur le risque sanitaire pour l'homme. La concentration en nématicide dans le fruit peut être décrite par une courbe de Gauss fonction de l'intervalle de temps entre la dernière application du produit et la récolte du fruit. Lorsque l'application de nématicide est réalisée sur un peuplement de bananiers hétérogène (plantes à des stades phénologiques différents), le taux potentiel de résidu dans le fruit à la récolte est donc variable selon le stade phénologique de la plante au moment de l'application du produit. Le module phénologique SIMBA-POP (A4) a été utilisé pour simuler l'évolution du risque sanitaire pour l'homme au cours du temps, sachant que l'hétérogénéité du peuplement évolue. Les simulations montrent que la concentration en fosthiazate (nématicide calibré pour la simulation) dans les fruits varie en fonction du programme d'application des nématicides, du climat (température) et de la date de plantation. La méthode a été utilisée pour évaluer le taux de régimes qui excèdent une valeur seuil de résidus pour différentes variables, permettant ainsi l'élaboration de recommandations aux producteurs pour minimiser le risque. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication (A9).

III.2.2.3. Représenter et modéliser la dynamique du parasitisme tellurique

Les principales solutions envisagées afin de limiter le développement des populations de nématodes (et, donc, l'emploi de pesticides) font intervenir des rotations culturales avec d'autres cultures (canne à sucre ou ananas) ou avec de la jachère (naturelle ou contrôlée). Ces rotations ont pour but de modifier la structure spécifique du peuplement de nématodes des parcelles. Une autre voie explorée consiste à réintroduire des éléments de biodiversité dans le champ cultivé par exemple par le biais de plantes de couverture (C50, C59). Afin d'évaluer l'efficacité des différents agencements de rotations culturales il est nécessaire de pouvoir appréhender les dynamiques des populations des différentes espèces de nématodes phytoparasites du bananier. Abordée précédemment sur ananas (C13), la question de l'impact des nématodes sur le fonctionnement d'un peuplement cultivé reste une question complexe mais incontournable pour aborder la durabilité de nombreux systèmes de culture horticoles. Elle implique la mobilisation du savoir d'autres disciplines (celles de la protection des plantes) et la mise en œuvre d'outils spécifiques de modélisation. Notre objectif est ici de modéliser la dynamique des nématodes du bananier, bioagresseurs essentiels, en interaction avec la dynamique de la population de bananiers. Le modèle SIMBA-NEM, réalisé dans le cadre de la thèse de Philippe Tixier en collaboration avec Jean-Marc Risède, pathologiste et avec l'appui de Eric Quénéhervé, nématologiste de l'IRD, simule la dynamique de *Radopholus similis* et *Pratylenchus coffeae*, les deux principales espèces de nématodes phytoparasites du bananier aux Antilles.

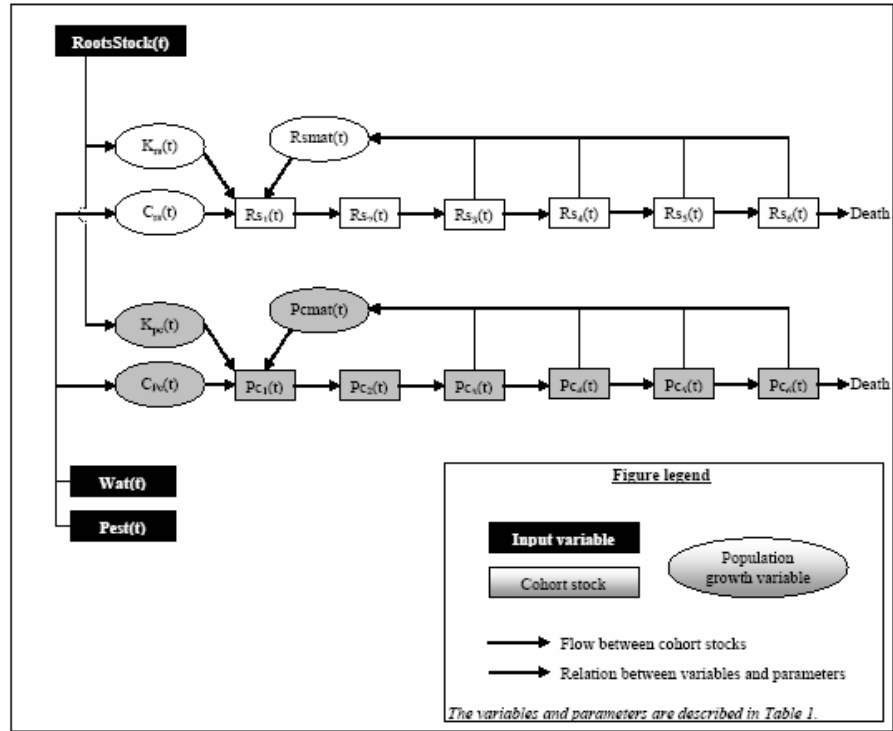


Figure 18 : Structure of the SIMBA-NEM model. At each time step t of the model for each species, $Rs_i(t)$ and $Pc_i(t)$ represent the number of nematodes in cohort i , $Rsmat(t)$ represent the number of mature nematodes, $K_{Rs}(t)$ and $K_{Pc}(t)$ the carrying capacity and $C_{Rs}(t)$ the population growth parameter for *R. similis* (Rs) and *P. coffeae* (Pc) respectively and $RootsStock(t)$, $Wat(t)$ and $Pest(t)$ represent the banana, fresh root biomass, percentage of soil water and soil nematicide quantity, respectively. **Extrait de A7.**

Input variables	Meaning
$RootsStock(t)$	Banana root fresh biomass at step t ($g \cdot ha^{-1}$)
$Wat(t)$	Soil water content at step t in percentage of stock (%)
$Pest(t)$	Grams of nematicide active product in soil per hectare at step t ($g \cdot ha^{-1}$)
$Rs_1(t)$, $Pc_1(t)$	Initial nematode number for Rs and Pc (in number of nematode per hectare, $nb \cdot ha^{-1}$)
Output variables	Meaning
$K_{nematot}(t)$	Total carrying capacity in nematodes per hectare at step t ($nb \cdot ha^{-1}$)
$K_{Rs}(t)$, $K_{Pc}(t)$	Carrying capacity per hectare for Rs and Pc at step t ($nb \cdot ha^{-1}$)
$C_{Rs}(t)$, $C_{Pc}(t)$	Growth rate at step t for Rs and Pc
$FX_{nematot}(t)$	Nematicide effect at step t
$FX_{wat}(t)$	Soil water content effect at step t
Parameters	Meaning
$K_{nematot}Max$	Maximum carrying capacity per gram of root ($nb \cdot g^{-1}$)
C_{pot} , b_{pot}	Intrinsic growth rate for Rs and Pc
a_{pot} , b_{pot}	Parameters of the nematicide effect curve $FX_{nematot}(t)$
a_{wat} , b_{wat} , c_{wat}	Parameters of the soil water content effect curve $FX_{wat}(t)$

Where 'i' is the number of the cohort and 't' the step of the model ; Rs for *Radopholus similis* and Pc for *Pratylenchus coffeae*

Tableau 2

Equations	Equation number
$K_{nematot}(t) = RootsStock(t) * K_{nematot}Max$	Eq. 1
$K_{Rs}(t) = K_{nematot}(t) * Pctotal(t-1)$ (for $t > 1$)	Eq. 2
$K_{Pc}(t) = K_{nematot}(t) * Rstotal(t-1)$ (for $t > 1$)	Eq. 2'
$C_{Rs}(t) = C_{pot} * FX_{nematot}(t) * FX_{wat}(t)$	Eq. 3
$C_{Pc}(t) = C_{pot} * FX_{nematot}(t) * FX_{wat}(t)$	Eq. 3'
$Rstotal(t) = Rs_1(t) + Rs_2(t) + Rs_3(t) + Rs_4(t) + Rs_5(t) + Rs_6(t)$	Eq. 4
$Rsmat(t) = Rs_5(t) + Rs_6(t) + Rs_3(t) + Rs_4(t)$	Eq. 4'
$Rs_1(t) = (C_{Rs}(t) * Rsmat(t-1)) * ((K_{Rs}(t) - Rstotal(t-1)) / K_{Rs}(t))$ (for $t > 1$)	Eq. 4''
$Rs_{i+1}(t) = Rs_i(t-1)$ (for $i > 1$ and for $t > 1$)	Eq. 4'''
$Pctotal(t) = Pc_1(t) + Pc_2(t) + Pc_3(t) + Pc_4(t) + Pc_5(t) + Pc_6(t)$	Eq. 5
$Pcmat(t) = Pc_5(t) + Pc_6(t) + Pc_3(t) + Pc_4(t)$	Eq. 5'
$Pc_1(t) = (C_{Pc}(t) * Pcmat(t-1)) * ((K_{Pc}(t) - Pctotal(t-1)) / K_{Pc}(t))$ (for $t > 1$)	Eq. 5''
$Pc_{i+1}(t) = Pc_i(t-1)$ (for $i > 1$ and for $t > 1$)	Eq. 5'''
$Rs(t) = Rstotal(t) / RootsStock(t)$	Eq. 6
$Pc(t) = Pctotal(t) / RootsStock(t)$	Eq. 6'
$FX_{nematot}(t) : \begin{cases} \text{if } Pest(t) > a_{pot} & \text{then } b_{pot} \\ \text{otherwise } ((b_{pot}-1) / a_{pot}) * Pest(t) + 1 \end{cases}$	Eq. 7
$FX_{wat}(t) : \begin{cases} \text{if } Wat(t) < a_{wat} & \text{then } (((1-b_{wat})/a_{wat}) * Wat(t) + b_{wat}) \\ \text{otherwise } (((1-c_{wat})/(a_{wat}-1)) * Wat(t) + (c_{wat}-((1-c_{wat})/(a_{wat}-1)))) \end{cases}$	Eq. 7'

The variables and parameters are described in Table 1.
For $t=0$ $Pctotal(t-1)$ and $Rstotal(t-1)$ are considered equal to the initial nematodes populations.

Tableau 3

Ce modèle permet, à partir d'une situation initiale du peuplement de nématodes, de simuler sur le long terme l'évolution relative des peuplements des deux espèces de nématodes retenues. Il fait l'objet d'une publication dans la revue *Ecological Modelling* (A7). La structure du modèle, les variables et paramètres utilisés, ainsi que les principales équations sont reportées sur la figure 18 et les tableaux 2 et 3. Ce modèle, basé sur les connaissances actuelles de la biologie des deux parasites considérés repose sur 7 hypothèses majeures qui concernent i) le cycle de vie des parasites, ii) les relations trophiques dans le système végétal-parasite, iii) l'impact des principaux facteurs du milieu (eau et nématicide) sur les populations :

- La durée d'un cycle de vie d'un nématode est approximativement de 6 semaines (hypothèse 1)
- La maturité est obtenue 3 semaines après éclosion (Hypothèse 2)
- La capacité maximale d'une population de nématodes dépend de la biomasse racinaire présente (hypothèse 3)
- Les différentes populations de nématodes sont en compétition pour la ressource racinaire du bananier (Hypothèse 4)
- la croissance des populations de nématodes suit une loi logistique (hypothèse 5)
- la teneur en eau du sol influe sur le taux de croissance des populations de nématodes (hypothèse 6)
- la quantité de nématicide dans le sol a une influence directe sur le taux de croissance des populations de nématodes (hypothèse 7)

Ce modèle, intégré au modèle global SIMBA, permet de simuler la contrainte parasitaire et ses effets sur le peuplement de bananiers (chutes et problèmes trophiques) et donc d'évaluer la durabilité agronomique des systèmes simulés (A14). La bonne représentation par ce modèle des dynamiques complexes des populations de nématodes dans les peuplements bananiers (figure 19) permet aujourd'hui d'envisager son utilisation pour une gestion raisonnée des peuplements limitant l'emploi des pesticides. Il constitue une tentative majeure (et assez rare nous semble-t-il) de lien opérationnel entre les connaissances des pathologistes et celles des agronomes pour la création d'un outil de représentation conjointe des dynamiques couplées des parasites et des plantes cultivées. L'extension de cet outil à un niveau d'organisation supérieur (bassin versant) doit être envisagée en collaboration avec des nématologistes et des hydrologues, pour une gestion optimisée des peuplements et une appréhension des risques à l'échelle du bassin versant, échelle à laquelle s'exprime préférentiellement le risque phytosanitaire.

III.2.2.3. Rpest, un indicateur pour évaluer le risque de pollution par les produits phytosanitaires

D'une manière générale, l'évaluation multicritère de systèmes de culture requiert la mise au point d'indicateurs spécifiques et intégrateurs. La plupart des indicateurs agri-environnementaux existants ont été conçus pour une évaluation annuelle de systèmes de culture, le plus souvent sur la base d'un seul cycle de culture. A ce pas de temps, il est souvent impossible de détecter l'existence de risques à court terme ou encore d'effectuer un monitoring des variations du risque au cours du temps.

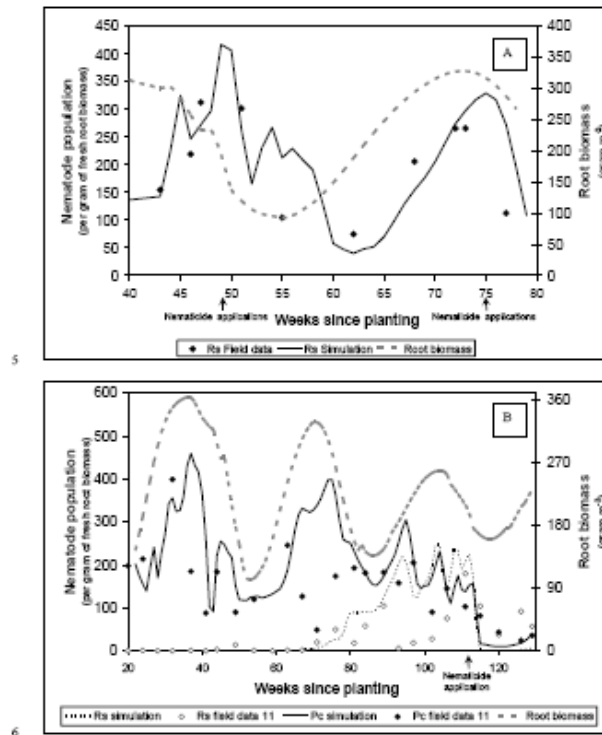


Figure 19 : Time-course variation in measured and simulated by SIMBA-NEM population of *Radopholus similis* (Rs) and *Pratylenchus coffeae* (Pc) expressed in number of nematodes per gram of fresh root biomass and the root biomass (g.m⁻²) for two pest management strategies, monocultures with pesticides (A) and banana after sugarcane with low pesticide input (B).

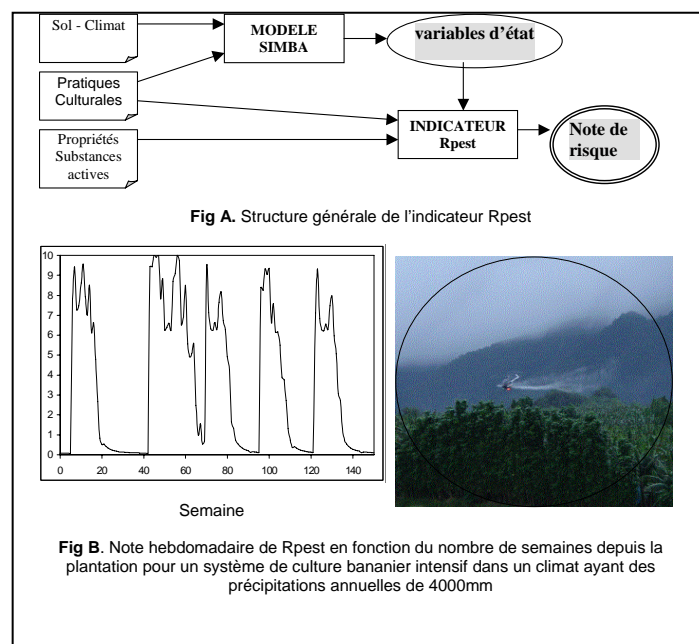


Figure 20 : Rpest, un indicateur d'évaluation dynamique des risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires (d'après A9).

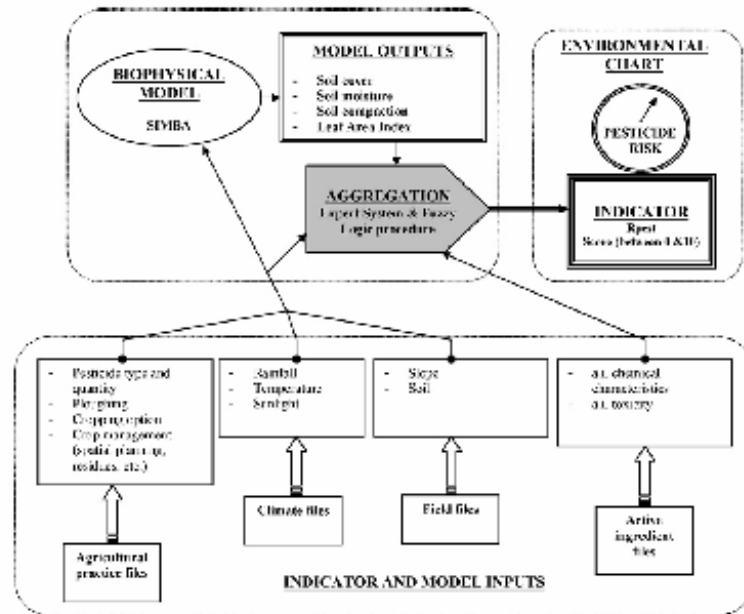


Figure 21 : General structure of the dynamic Rpest indicator. A.i. for active ingredient.

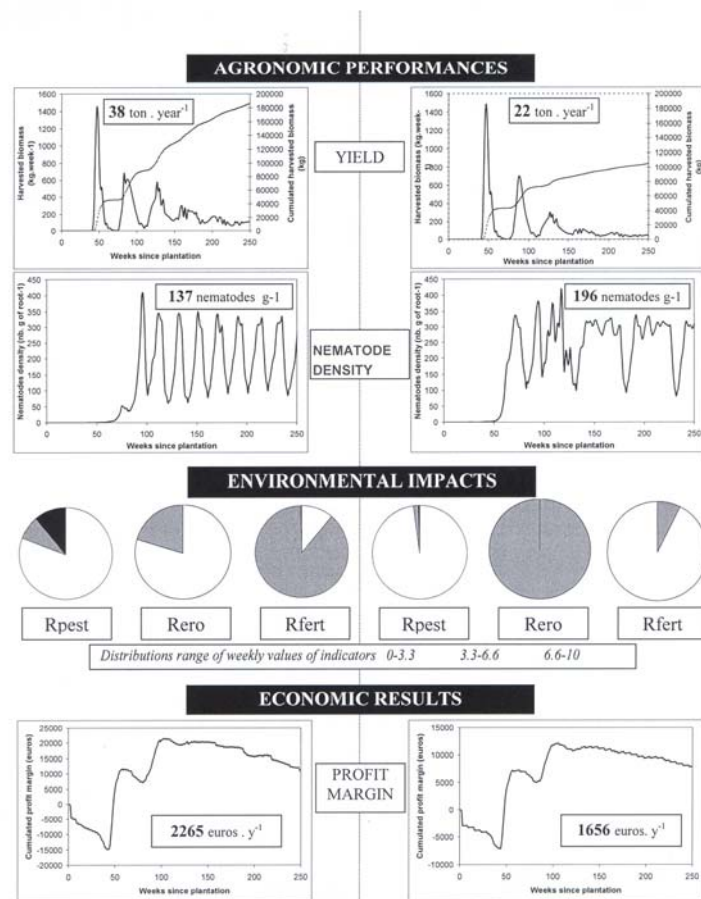


Figure 22 : Use of the SIMBA's control panel to evaluate an intensive cropping system and an extensive cropping system over 250 weeks of simulation at the elevation of 250 meters (simulation I and II in Table. 5).

En conséquence, ces indicateurs ne sont pas adaptés à l'évaluation de systèmes pérennes ou semi-pérennes comme les systèmes bananiers, dont la structure (et les risques associés) évoluent au cours du temps. Des indicateurs nouveaux doivent donc être conçus et testés pour évaluer les risques à court terme mais sur un pas de temps long tout en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de systèmes pérennes hétérogènes. Ces indicateurs requièrent la connaissance de l'évolution au cours du temps de variables d'état du système comme la couverture, le niveau de compaction ou l'état hydrique du sol, la surface foliaire, la structure phénologique du peuplement, etc. L'utilisation de certaines variables de sortie des modules biophysiques comme données d'entrée au calcul de l'indicateur constitue donc a priori un moyen pour permettre l'évaluation au cours du temps de certains risques environnementaux comme le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et le risque d'érosion. C'est l'hypothèse que nous avons formulée et testée dans le cadre des systèmes bananiers aux Antilles. Dans les principales régions productrices de banane, les systèmes de monoculture subissent une forte pression parasitaire à l'origine d'une utilisation massive de produits phytosanitaires, susceptible de générer d'importantes pollutions des eaux de surface et de profondeur. Nous nous sommes donc concentrés dans un premier temps sur l'évaluation du risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires, à l'origine de très importantes perturbations écologiques, sanitaires et sociales dans de nombreuses régions productrices, en construisant un indicateur dynamique adapté aux bananeraies : Rpest (figure 20).

La structure générale de l'indicateur Rpest a été construite dans la perspective d'évaluer et de comparer des systèmes de culture par rapport à ce risque environnemental (fig. 21). Cet indicateur permet le calcul d'une note de risque selon une méthodologie déjà proposée par Girardin et al. (2002), en intégrant des variables relatives à l'état du milieu, aux pratiques culturales et aux caractéristiques des substances actives concernées. La méthode d'agrégation est basée sur un système expert et utilise la logique floue. Les variables d'état du milieu qui sont utilisées pour le calcul de l'indicateur sont des sorties du modèle SIMBA, ce qui permet de calculer une note de risque au même pas de temps hebdomadaire que le modèle. La note calculée permet dans un premier temps de détecter les périodes de risques générées par les systèmes simulés et dans un second temps, après avoir intégré les notes de risque sur l'ensemble de la période de culture, de comparer les systèmes entre eux. Cette méthodologie nouvelle et originale, basée sur le principe de couplage d'un modèle de culture et d'un indicateur agri-environnemental dynamique, a fait l'objet de communications dans des congrès scientifiques (C49) et d'une publication dans la revue *European Journal of Agronomy* (A8). La méthode de calcul de l'indicateur Rpest est détaillée dans cet article.

III.2.2.4. Utilisation de SIMBA pour l'évaluation et la conception de systèmes durables

La démarche retenue pour concevoir le modèle SIMBA, sa description et son utilisation pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture bananiers ont fait l'objet d'une publication soumise à la revue *Agricultural Systems* (A14) et de plusieurs communications dans des congrès internationaux (C53, C55, C61). Le modèle SIMBA, en fournissant des séries temporelles de variables agronomiques (rendement), environnementales (Rpest) et économiques (marge brute), permet une évaluation multicritère de systèmes de culture simulés selon plusieurs points de vue. Les pratiques culturales sont prises en compte à travers des règles de décision qu'il est ainsi possible d'évaluer. Il est ainsi possible d'optimiser certaines pratiques par la simulation, comme par exemple la date de plantation ((A10). La figure 22 constitue l'illustration d'un tableau de bord de la conduite de la culture (C53), qui peut constituer le point de départ d'une démarche de pilotage ou d'une évaluation a posteriori. SIMBA peut également être utilisé dans une démarche de conception : il a ainsi été utilisé selon une méthode originale de prototypage en deux étapes (exploration globale puis optimisation spécifique), sur 4050 systèmes différents simulés sur une période de 5 ans pour les variables « profit » (marge brute, en

abscisse) et « impact sur l'environnement ». Les résultats obtenus permettent d'identifier certains systèmes de culture qu'il conviendra de tester 'au champ' parce qu'ils combinent des avantages comparatif vis-à-vis de l'un ou l'autre des objectifs, ou une combinaison des deux.

Cette approche systémique et fonctionnelle, qui a permis des avancées significatives au niveau de la modélisation des systèmes bananiers, constitue un outil performant pour la conception de systèmes de culture durables (A14). A partir de maintenant, la construction et l'évaluation de règles de décision par expérimentation système au champ peuvent être réalisées, sur la base des simulations effectuées. L'articulation des règles de décision à l'échelle de la parcelle avec les procédures de coordination des règles dans un ensemble de parcelles, au sein d'une exploitation ou d'une portion d'espace ou de territoire (bassin versant, paysage) constitue un autre champ d'étude. Cette approche de conception a été approfondie dans le cadre du projet ADD GeDuQuE³³ retenu par l'ANR en 2005 et auquel je participe. Dans ce cadre, les conditions d'émergence des innovations techniques face aux risques environnementaux sont étudiées dans le cas de la culture bananière en Guadeloupe. Les solutions explorées par la recherche et l'évolution des pratiques par les agriculteurs sont mises en parallèle. Cette analyse des innovations fait l'objet d'une analyse pluridisciplinaire publiée (AN10, B10, C51).

III.2.2.5. Conclusion

Nous avons fait dans ce qui précède l'hypothèse que la conception de systèmes de culture durables impose de travailler à la mise en cohérence des deux sous-systèmes biophysique et technique. Ce cadre d'analyse peut être appliqué à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou du territoire. Toutefois, ces deux objets peuvent être étudiés séparément, par exemple sur des questions spécifiques à l'interface **agronomie-écologie** ou au contraire à l'interface agronomie-sciences de l'ingénierie. C'est en particulier le cas pour aborder les questions liées au **rôle de la diversité biologique dans le fonctionnement des systèmes de culture** que nous abordons dans ce qui suit et que nous développerons de manière privilégiée dans notre projet de recherche.

III.3. Evaluer des systèmes complexes : premiers travaux d'analyse des systèmes agroforestiers en zone tropicale humide

III.3.1. Introduction

L'analyse des limites écologiques du processus d'intensification de la production végétale, combinée à l'affirmation de la prégnance des fonctions productives des systèmes de culture (notamment dans les pays du Sud), nous ont conduit à orienter ces dernières années nos recherches vers des systèmes de culture que nous appellerons « plurispécifiques ». Par opposition à la simplification biologique des systèmes sur laquelle s'est fondée l'intensification de l'agriculture depuis 40 ans, ces systèmes de culture sont basés sur l'utilisation de la diversité biologique des espèces cultivées dans des combinaisons spatiales et/ou temporelles spécifiques. L'hypothèse principale que nous voulons tester³⁴ est que la combinaison de plusieurs espèces végétales dans les systèmes de culture est déterminante pour assurer des performances agronomiques régulières (rendement, qualité) tout en limitant les impacts environnementaux négatifs (pollution de l'eau, érosion, impacts sur la biodiversité, ...) car elle

33 Innovations agro-écologiques et organisationnelles pour une Gestion Durable de la Qualité de l'Eau dans des régions de monoculture à forts niveaux d'intrants phytosanitaires. Projet coordonné par Christian Gary (UMR SYSTEM) et qui porte sur les systèmes bananiers et les systèmes viticoles

³⁴ Hypothèse centrale de l'UMR SYSTEM, voir le Projet de Recherche

permet de mieux valoriser les ressources physiques (lumière, eau et azote en particulier) et les processus biologiques naturels (par exemple la régulation des populations de bioagresseurs par alternance des hôtes et par stimulation de leurs parasites).

Dans les pays tempérés, ainsi que dans les agricultures tropicales intensives, on constate aujourd'hui un fort regain d'intérêt pour les systèmes multi-espèces basés sur l'association temporelle et/ou spatiale de plusieurs espèces à fonction de production, par exemple l'association de grandes cultures comme le blé et d'arbres à bois précieux comme le noyer (Dupraz et Capillon, 2005) ou bien d'une espèce à fonction de production et d'une ou plusieurs espèces à fonctions de « service ». C'est par exemple le cas pour l'enherbement des vignes (Gary et al., 2005), ou pour l'emploi de cultures intercalaires (plantes de couverture) dans les systèmes en semis-direct (Scopel et al, 2005)³⁵.

Au-delà de l'intérêt des chercheurs, ces systèmes multispécifiques questionnent les professionnels agricoles comme en témoignent :

- l'importance vitale des systèmes multi-espèces dans les pays à intrants rares et/ou chers. Par exemple, plus de 95% de la surface plantée en cocotier dans le monde (11 millions d'hectares) est sous forme de cocoteraies villageoises dans lesquelles on trouve très souvent des cultures intercalaires.
- le développement des agricultures certifiées sans intrant chimique (Agriculture Biologique). En France, toutes les légumineuses à graines sont cultivées en culture pure, alors que l'association avec des céréales est la règle en Agriculture Biologique et en Asie (Wéry et Alhawwat, 2006).
- la volonté, affichée par les professionnels et mise en œuvre par certains agriculteurs, de retour vers ces pratiques dans des systèmes qui avaient poussé à l'extrême la réduction de la diversité végétale (ex. vignes et bananeraies).

La satisfaction des objectifs des filières (qualité) et des acteurs (rentabilité et besoin en main d'œuvre) restent pourtant des objectifs forts assignés à ces systèmes. Ainsi, ces systèmes peuvent être très performants au niveau environnemental, en lien avec la réduction des pesticides, des engrais, de l'érosion, mais aussi au niveau agronomique (rendement et qualité) mais ils sont aussi beaucoup plus complexes à construire et à conduire que les systèmes monospécifiques. Ils posent ainsi de nombreuses questions de recherche sur :

- leurs effets à long terme en lien avec la fertilité des sols,
- des propriétés émergentes exploitables en agriculture mais difficiles à quantifier et à prévoir à partir des connaissances actuelles : relations de facilitation entre espèce et productivité, dynamique de l'eau et des éléments minéraux, dynamiques spatiale et temporelle des parasites telluriques comme les nématodes (sur bananier par exemple) ou aériens comme les insectes ou les champignons (sur vigne par exemple).

Une synthèse complète des concepts, des outils et des modèles utilisés pour comprendre les systèmes de culture plurispécifiques a été réalisée sous ma coordination et est en cours de publication dans la revue *Agronomy for Sustainable Development* (A13).

³⁵ Ces systèmes sont étudiés par des équipes de l'Inra et du Cirad dans l'UMR SYSTEM

List of conspicuous species		Uses						
Scientific name	Local name (bishlama)	Sold	Eaten	Building	Burned	Used in everyday life	Eaten by animals	Magic and medicinal uses
<i>Abelmoschus manihot</i>	aeland kappish	⊕	⊕					
<i>Ananas comosus</i>	pineapple	⊕	⊕					
<i>Annona</i> spp.	korrosol	⊕	⊕		⊕			⊕
<i>Artocarpus altilis</i>	breadfruit	⊕	⊕	⊕		⊕		⊕
<i>Barringtonia edulis</i>	navele	⊕	⊕		⊕			⊕
<i>Canarium indicum</i>	nangaie	⊕	⊕	⊕	⊕			⊕
<i>Carica papaya</i>	paw paw	⊕	⊕				⊕	⊕
<i>Citrus grandis</i>	pomelos	⊕	⊕		⊕			
<i>Citrus limon</i>	lemon tree	⊕	⊕		⊕	⊕		
<i>Citrus reticulata</i>	mandarine	⊕	⊕		⊕			
<i>Dioscorea</i> spp.	soft yam	⊕	⊕					⊕
<i>Discorea nummularia</i>	strong yam	⊕	⊕					
<i>Erythrina variagata</i>	narara					⊕		⊕
<i>Heliconia indica</i>	leaf lap lap	⊕				⊕		
<i>Hibiscus tiliaceus</i>	bourrao		⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
<i>Inocarpus fagiferus</i>	namambé	⊕	⊕					⊕
<i>Macaranga</i> spp.	navenue			⊕	⊕	⊕		⊕
<i>Mangifera indica</i>	mango	⊕	⊕				⊕	
<i>Manihot esculenta</i>	maniok	⊕	⊕					
<i>Metroxylon warburghii</i>	natangora	⊕		⊕				⊕
<i>Musa</i> spp.	banana	⊕	⊕			⊕		⊕
<i>Pometia pinnata</i>	nandao	⊕	⊕	⊕	⊕			⊕
<i>Psidium guajava</i>	guava	⊕	⊕					⊕
<i>Saccharum officinarum</i>	sugarcane	⊕	⊕					
<i>Spondias dulis</i>	naos	⊕	⊕					⊕
<i>Vanilla planifolia/tahitensis</i>	vanilla	⊕						
<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	taro Fiji	⊕	⊕					⊕

Table 4 : List of local, scientific names and uses of the conspicuous species reported in coconut plots on Malo Island, Vanuatu. **Extrait de A6.**

Cette synthèse a été proposée à mon initiative au groupe Systèmes de Culture du département Environnement et Agronomie de l'INRA et validée avant soumission à la Revue. Elle devrait faire aussi l'objet d'un ouvrage édité par la revue.

III.3.2. L'Evaluation des systèmes agroforestiers

Les systèmes agroforestiers tropicaux, au-delà des enjeux écologiques, économiques et sociaux qu'ils représentent, constituent pour aborder ces questions des systèmes « modèles » au plan scientifique³⁶. La mise au point d'une méthodologie spécifique pour les évaluer est nécessaire; celle-ci a fait l'objet d'un premier travail, appliqué aux systèmes agroforestiers à base de cocotiers au Vanuatu³⁷.

Le cocotier occupe une place prépondérante dans la culture et l'économie de nombreuses régions côtières et insulaires des zones tropicales humides. Dans les îles du Pacifique, il a toujours constitué une culture vivrière multi-usage dans le système traditionnel, avant d'acquérir le statut de culture de rente avec le développement du commerce du coprah (albumen séché de la noix de coco) pour les marchés européens. Le développement des plantations, qui occupent aujourd'hui 60% de l'espace cultivable des îles du Nord de l'archipel du Vanuatu, a ainsi progressivement modifié les systèmes de culture traditionnels, en repoussant les jardins vivriers de plus en plus loin des villages. Aujourd'hui différents systèmes pluri-spécifiques où les cocotiers peuvent être associés à de nombreuses espèces animales et/ou végétales coexistent, et où les plantes cultivées ont des fonctions et des usages extrêmement variés (voir à titre d'exemple le tableau 4 sur la page jointe, qui illustre la situation sur l'île de Malo, Vanuatu).

Dans un contexte d'augmentation de la pression foncière et de tendance à la chute des cours du coprah, paysans et organismes de développement s'interrogent sur les moyens d'améliorer la rentabilité économique et la durabilité agroécologique de ces systèmes. La longueur du cycle biologique des cocotiers (environ 80 ans) et la multiplicité des associations mises en œuvre sur les parcelles paysannes soulèvent des difficultés méthodologiques spécifiques pour caractériser et évaluer les systèmes de culture à base de cocotiers. Dans ce contexte, notre objectif a été de mettre au point une **démarche de diagnostic agronomique et écologique** des systèmes de culture agroforestiers paysans à base de cocotier, dans la perspective d'orienter leur devenir au travers de propositions d'innovations adaptées. La thèse de Nathalie Lamanda a permis de conduire concrètement des recherches sur ce thème. Ces recherches sont basées sur l'**utilisation du concept de système de culture dans les conditions de l'agroforesterie tropicale**, souvent caractérisée par une diversité biologique élevée, et dont la durabilité écologique, économique et sociale repose sur cette diversité.

La démarche a comporté deux phases : (1) la caractérisation des systèmes de culture à base de cocotiers et (2) l'évaluation agronomique et écologique de ces systèmes³⁸.

³⁶ Voir la partie suivante : Projet de Recherche

³⁷ ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Nathalie Lamanda (Lamanda, 2005), que j'encadrerai en co-direction avec P.Martin (AgroParistech) et T. Doré (AgroParistech)

³⁸ Certains résultats de cette partie, de nature écophysologique, ont été présentés dans la partie I.3 de ce mémoire

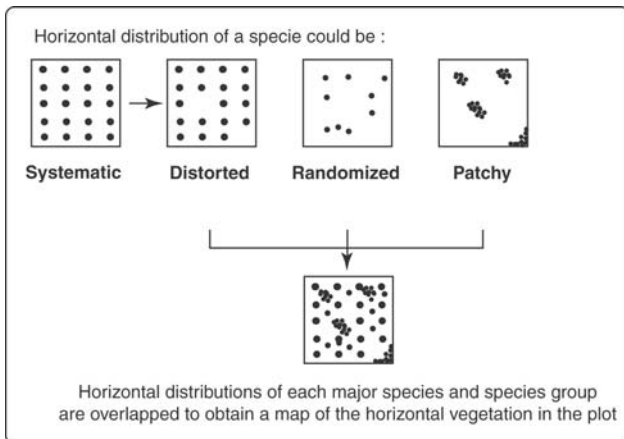


Figure 23 : Les différents types de distribution horizontale de la végétation dans les parcelles agroforestières à base de cocotier sur l'île de Malo, Vanuatu.
Extrait de A6.

Figure 24 : Classification of coconut plots into structural groups on Malo (Vanuatu).
Extrait de A6.

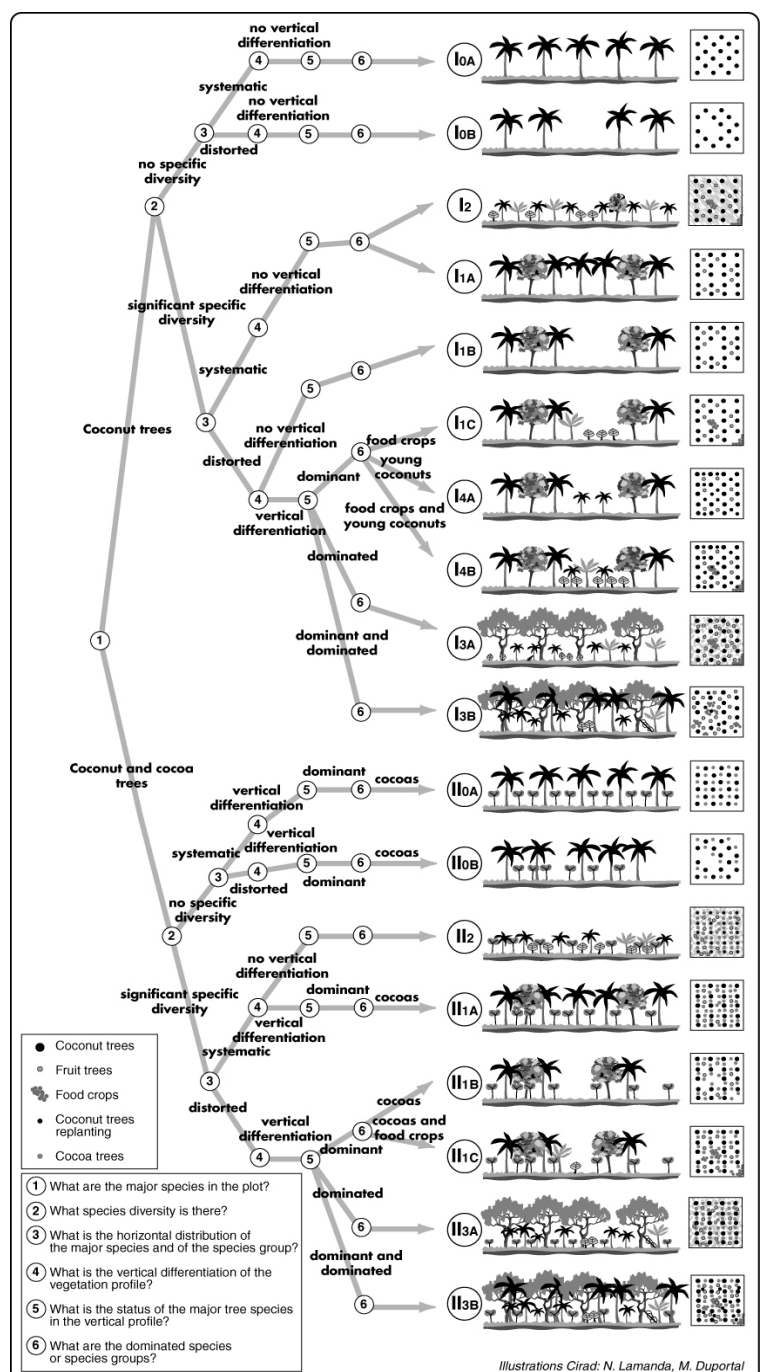




Figure 25 : Pictures of some structural groups described on Malo Island (Vanuatu).

I_{1A} : Plot of coconut trees with a significant species diversity (on the back of the picture *Mangifera indica* and *Hibiscus tilaceus* are associated to coconut trees). Systematic pattern of plantation of coconut trees (++) and no vertical differentiation of the vegetation profile.

I_{3B} : Plot of coconut trees with a significant species diversity. Distorted pattern of plantation of coconut trees and a vertical differentiation of the vegetation profile where coconut trees are dominant (e.g. a first generation of coconut trees dominates a younger generation and *Annona spp.* at the first level of the picture) and dominated (mainly by forest trees).

I_{1C} : Plot of coconut trees with a significant species diversity. Distorted pattern of plantation of the coconut trees and a vertical differentiation of the vegetation profile. Food crops as *Musa spp.*, that constitute the lower stratum of the vegetation profile, are cultivated into a gap between coconut trees.

Extrait de A6.

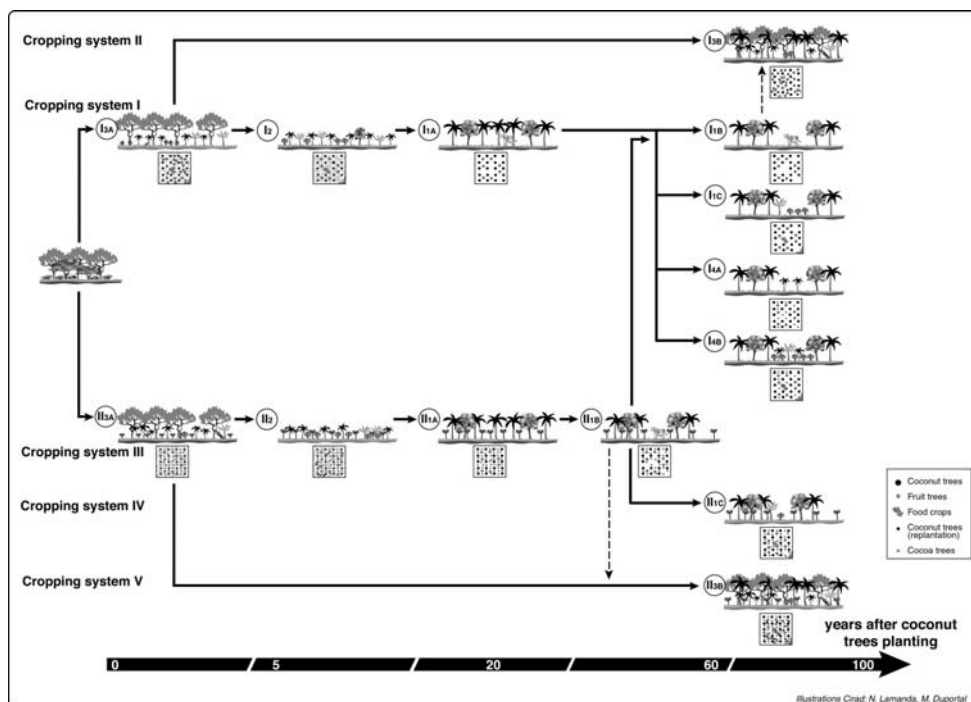


Figure 26 : Temporal changes in the vegetation structure in coconut-based cropping systems on Malo Island (Vanuatu). **Extrait de A6.**

Elle a été appliquée sur l'île de Malo (Vanuatu : 67°10'S, 15°40'E) qui présente un contexte caractéristique de production paysanne de coprah.

Dans un premier temps, les différents systèmes de culture et leurs dynamiques temporelles ont été caractérisés à partir de l'étude de la diversité de situations existant sur les parcelles paysannes de la zone d'étude (C41, C45).

Cette diversité de situations a d'abord été décrite selon une méthodologie mise au point spécifiquement, basée sur l'analyse de chronoséquences identifiées. Cette méthodologie, adaptée aux caractéristiques des systèmes agroforestiers, repose sur une classification en fonction de la structure de la végétation observée sur les parcelles. L'identification de toutes les espèces cultivées (ou potentiellement utilisables), leur nombre et leur importance (densité), leurs répartitions horizontale et verticale servent de base à cette classification. Théoriquement, la répartition horizontale (ou la répartition au sol) d'une espèce peut être de type « régulière » lorsqu'une espèce est implantée selon un motif régulier), « aléatoire » ou « groupée ». Une répartition de type « régulière » peut être modifiée par la disparition de quelques individus dans le motif (suite à leur mortalité ou abattage), on parlera alors de « répartition altérée ». Lors d'une première étape, le type de répartition horizontale de chaque espèce ou catégorie d'espèce présent sur la parcelle est ainsi superposé pour une obtenir une « carte de structure » de la végétation sur la parcelle (la figure 23 présente une schématisation de cette démarche). Cette première identification sert alors de base à la classification des parcelles en « groupes structurels ». Quatorze groupes structurels ont progressivement été identifiés à partir des 190 parcelles paysannes de cocotiers qui composent l'échantillon étudié, auxquels ont été ajoutés 4 groupes structurels absents correspondant à des situations observées en plantations industrielles (figure 24). Les parcelles peuvent présenter des profils mono ou multistrates, avec ou sans trouées, et peuvent être rattachées à différents modèles de végétation présentant un gradient plus ou moins fort de compétition pour l'espace ou la lumière. Quelques situations culturelles sont représentées sur la figure 25. Les parcelles ainsi décrites et classifiées sont positionnées dans une matrice des situations culturelles, en fonction de leur groupe structurel et du stade de développement des cocotiers sur la parcelle. Les parcelles sont ainsi ordonnées selon un axe temporel (lié au stade de développement des cocotiers) en mobilisant les histoires culturelles des parcelles décrites, introduisant ainsi la dynamique temporelle dans la représentation du système. Cinq trajectoires (succession de situations culturelles au cours du développement des cocotiers) ont ainsi pu être identifiées (figure 26). Elles décrivent l'évolution du système à partir des situations de départ (défriche de la forêt secondaire ou d'une jachère arborée). A titre d'exemple, le système I (de type agropastoral) est initié à partir de l'implantation de cocotiers et espèces fruitières en association dans une défriche de forêt secondaire dans laquelle est établi un jardin vivrier (I2). Après quelques années le jardin vivrier est progressivement abandonné. Lorsque les cocotiers entrent en production, environ 7 années après leur introduction et après l'ouverture de la canopée, la strate formée par les cocotiers et les arbres fruitiers est assez haute pour que des bovins soient introduits dans la parcelle (I1A). Les bovins pâturent alors les résidus de jardins vivriers puis la couverture herbacée spontanée du sol. La parcelle est alors essentiellement dédiée à la production de coprah. Avec le temps des trouées apparaissent dans le motif de plantation des cocotiers (I1B). Les bovins peuvent être maintenus sur la parcelle jusqu'à la sénescence des cocotiers. Des espèces alimentaires semi-pérennes comme le bananier ou le macabo peuvent être introduites dans les trouées, avec des protections aménagées à l'encontre des bovins. Une nouvelle génération de cocotiers peut être implantée lorsque la génération initiale entre en sénescence ; les replantations sont alors réalisées à très haute densité (I4A) et les cocotiers parfois associés à des espèces alimentaires (I4B). Chaque système de culture identifié correspond à un type d'évolution de la structure de la végétation au cours du temps. On peut distinguer ainsi des systèmes marqués par une évolution vers des structures simples avec un profil constitué de 1 à 3 strates (systèmes I, III et IV) , ou vers des structures complexes avec un profil multistratifié (systèmes II et V). Dans le premier cas, l'implantation

d'une nouvelle génération de cocotiers environ 60 ans après la plantation de la première génération conduirait à une occupation permanente de l'espace cultivé par la cocoteraie. Lorsque la cocoteraie n'est pas replantée, l'espace pourrait être progressivement « recolonisé » par des cultures vivrières, installées en bordure des parcelles ou dans les trouées (I1C). Dans le second cas, la jachère complantée de cocotiers et éventuellement de cacaoyers évolue vers un système multistratifié dans lequel les différentes générations de cocotiers sont dominées et disparaissent progressivement. Ces systèmes constitueraient une jachère arborée qui, selon l'impact des cocotiers sur le milieu et la durée de la jachère, permettrait de régénérer puis de cultiver à nouveau l'espace occupé (Lamanda, 2005).

L'image satellite à très haute résolution a été également utilisée pour caractériser la structure spatiale de ces systèmes complexes et pour analyser leur distribution. Cette démarche nécessite des méthodologies spécifiques mais prometteuses (C43). L'ensemble constitue ainsi une méthodologie originale qui propose une démarche d'analyse des systèmes de culture agroforestiers complexes, ici appliquée aux systèmes agroforestiers à base de cocotiers du Vanuatu; les différents aspects de cette démarche font l'objet de plusieurs publications (A6, AN6, B9).

Au terme de cette première phase, un réseau de parcelles est constitué qui tient compte des différents stades de développement des cocotiers. Les performances et la dynamique des états du milieu dans ces systèmes ont ensuite été évalués conjointement. Des enquêtes auprès des exploitants ont d'abord été réalisées pour recenser les usages du peuplement, puis pour estimer les quantités de produits utilisés et commercialisés. Les productions des différentes espèces, regroupées selon les capacités de diagnostic, ont ensuite été estimées pour les différentes situations puis intégrées pour représenter et comparer les performances des principaux systèmes de culture. L'évolution de la production des cocotiers a été plus particulièrement étudiée. Les dynamiques des états du milieu; lumière, encombrement racinaire et matière organique, clés pour le fonctionnement de systèmes agroforestiers sont caractérisés à partir de mesures de terrain (C44). Le bilan radiatif et l'encombrement racinaire ont également été caractérisés à partir de simulations réalisées par des modèles 3D du peuplement de cocotiers³⁹. L'utilisation de modèles écophysio-logique 3D pour le diagnostic en milieu hétérogène constitue certainement un point innovant et porteur pour l'avenir (A11, C46).

La combinaison de ces différents résultats a permis de déboucher sur un ensemble de propositions des voies d'évolution des systèmes de culture mis en évidence⁴⁰. Ce travail a constitué une première étape dans la démarche d'analyse des systèmes de culture complexes ; son originalité réside principalement dans la démarche proposée pour aborder les dynamiques temporelles à long terme qui caractérisent les systèmes agroforestiers. Ces dynamiques à long terme ont rarement été prises en compte dans l'étude des systèmes agroforestiers. Celles-ci sont pourtant indispensables pour comprendre les performances actuelles des systèmes (rendements, services) et leurs possibilité d'évolution (replantations, introduction de nouvelles espèces, etc.). Au titre des apports méthodologiques, la matrice des situations culturelles est apparue comme un outil pertinent pour replacer les différents types de structure de la végétation dans une perspective temporelle sur la base de l'analyse des histoires culturelles des parcelles.

III.4. La prise en compte des grands enjeux planétaires

Au cours de ces 10 dernières années, les changements globaux auxquels fait face la planète orientent de plus en plus directement les recherches conduites par les organismes de recherche dans le domaine

³⁹ Les principaux résultats ont été présentés précédemment dans ce mémoire (chapitre II.2.)

⁴⁰ Nous ne les décrivons pas ici, se reporter à Lamanda (2005)

de l'agriculture. Mes fonctions d'animation et de direction de recherche dans le cadre de la direction scientifique du Cirad puis de l'UMR SYSTEM m'ont donc conduit à prendre en compte de manière plus explicite ces changements globaux dans mon approche des systèmes de culture et dans les recherches que j'étais amené à conduire directement dans ce domaine. Au-delà de certaines publications portant un regard sur le processus de diversification dans les agricultures du Sud et la manière de la caractériser (AN8, AN9), j'ai successivement porté mon attention et mon énergie sur les deux enjeux qui me paraissent les plus à même d'interagir avec les agricultures du monde : le changement climatique et la Biodiversité.

III.4.1. Adapter les systèmes de culture de demain au changement climatique

Aujourd'hui, le changement climatique constitue un enjeu et un défi majeur pour les écosystèmes de la planète. Mes fonctions d'animation scientifique au sein de la direction scientifique du Cirad dans le cadre de la délégation Ager⁴¹ m'ont conduit à engager dès 2000 de manière volontariste la réflexion prospective dans ce domaine, avec l'appui de Bernard Seguin aujourd'hui en charge de la Mission Changement Climatique à l'INRA. Cette réflexion a conduit à la réalisation de conférences et d'articles (A5, C37, C39, C40, C42, C52, P3, P4, P5, P6) et à la rédaction d'un ouvrage de synthèse et de vulgarisation (E6).

III.4.1.1. Le contexte

La constatation, dans le début des années 60, d'une augmentation significative de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a commencé à poser la question d'un possible effet des activités anthropiques sur l'effet de serre naturel, et par suite, sur le climat à l'échelle de la planète. A la fin du XXème siècle, la tendance à l'accroissement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère se poursuit au même rythme, et il a été établi entre-temps qu'elle s'accompagnait d'une évolution similaire pour d'autres gaz à effet de serre comme l'oxyde nitreux N₂O et le méthane CH₄, et ce en relation avec les activités agricoles au sens large.

Les conséquences prévisibles sur le climat ont fait ces dernières années l'objet de nombreuses tentatives de simulation, s'appuyant sur des moyens numériques et des modèles de plus en plus sophistiqués. Ils ont abouti à des scénarios dont la crédibilité scientifique a augmenté notablement (même si certains contestent aujourd'hui la capacité de ces outils à reproduire réellement les processus dans leur complexité). Le dernier rapport du GIEC fait maintenant état, pour la fin du XXIème siècle, d'une augmentation de température globale moyenne variant, selon les hypothèses retenues, entre 1.5°C et 6°C. C'est évidemment une fourchette très large, qui recouvre non seulement l'éventail de prévision de plusieurs modèles, mais aussi la prise en compte de scénarios variés sur les émissions de CO₂.

Un réchauffement significatif de l'atmosphère a par ailleurs été établi pour la deuxième moitié du XXème siècle. Les observations météorologiques l'attestent, en particulier pour les zones des latitudes les plus élevées de l'hémisphère nord. Les régions du Sud sont relativement épargnées par l'élévation de température jusqu'à présent, et les scénarios prévoient un réchauffement plus modéré (de l'ordre de 1 à 2°C), qui peut néanmoins avoir des effets significatifs sur l'agriculture. Ceci d'autant plus que les changements climatiques à venir devraient affecter non seulement la température, mais aussi d'autres facteurs, au premier rang desquels la pluviométrie. Le degré de confiance sur les scénarios est encore

⁴¹ Voir la première partie de ce mémoire

un peu plus limité pour ce facteur que pour la température, mais il s'améliore rapidement, et toujours avec la même indication générale : alors que les régions sèches du globe devraient voir leur pluviosité encore diminuer, celle-ci devrait augmenter dans les régions les plus humides et les plus froides. Comme le réchauffement climatique doit, par ailleurs, s'accompagner d'une légère mais significative augmentation de l'évaporation, l'interrogation sur l'eau, qui revêt déjà aujourd'hui une énorme importance pour les pays du Sud, prend encore plus d'ampleur. L'élévation concomitante prévue du niveau de la mer, qui peut menacer de grandes étendues de zones côtières et deltaïques, constitue un risque supplémentaire.

Les conséquences de ces changements sur l'agriculture sont de différente nature mais ils revêtent dans tous les cas un caractère complexe. Ils peuvent s'envisager, en premier lieu, sur la production primaire, à des niveaux allant de la feuille à l'écosystème : l'effet à priori positif d'une augmentation de la teneur en CO₂ sur le fonctionnement photosynthétique du couvert (qui doit toutefois être modulé en fonction du type de métabolisme C3 ou C4, et de la gamme de température), se traduit théoriquement par un accroissement de la biomasse produite et se complète par une augmentation de l'efficacité de l'eau (rapport de la biomasse produite à la quantité d'eau transpirée par la plante). Mais cet effet sera circonscrit aux cultures proches de l'optimum de production, et risque d'être contrebalancé par des stress hydriques plus élevés qu'aujourd'hui. Par ailleurs, l'augmentation de température peut avoir des conséquences variables sur d'autres aspects également déterminants de la production (raccourcissements des phases phénologiques ou dépassement des optimums thermiques par exemple), effets qui seront souvent négatifs dans les conditions tropicales ou subtropicales.

Bien sûr ces aspects liés au fonctionnement physiologique des couverts végétaux doivent être élargis à la prise en compte des autres composantes biologiques des agrosystèmes (dynamique des adventices, parasites et ravageurs), également perturbés, ainsi qu'à l'ensemble des éléments intervenants dans les systèmes de culture (choix variétaux, fertilisation, etc.) ou d'élevage (sélection génétique, comportement des animaux, production de fourrages, etc.). La mise au point et la conception de systèmes de culture et d'élevage adaptés à ces nouveaux environnements climatiques, et leur intégration par les agriculteurs constitue un enjeu majeur.

Plus globalement encore, les changements climatiques annoncés risquent d'exacerber les problèmes de l'eau (que ce soit en augmentant les besoins en eau pour les cultures irriguées, ou en rendant encore plus aiguë la compétition pour une ressource encore plus rare). La difficulté d'adaptation des agriculteurs à ces modifications peut entraîner de grands déséquilibres en matière d'utilisation de l'énergie, de la demande en eau, du commerce, du stockage et du transport des denrées alimentaires. La vulnérabilité des régions du Sud pourra même être accrue dans un contexte de mondialisation où certains pays du nord verront peut-être leurs capacités de production favorisées par ces mêmes changements climatiques.

Sans verser dans un catastrophisme systématique, les scénarios climatiques annoncés augmentent encore les inquiétudes structurelles sur les agricultures du Sud, si l'on prend en compte les menaces sur les surfaces potentiellement concernées par une élévation du niveau de la mer ou sur les écosystèmes naturels fragiles, l'ensemble de ces facteurs pouvant entraîner des déplacements de population de grande ampleur.

Dans ce contexte, les négociations internationales liées aux suites du protocole de Kyoto prennent, bien sûr, toute leur importance puisqu'elles conditionnent le devenir du climat dans 50 ans, et par là, l'avenir des agricultures du Sud et celui des populations qui en dépendent. Par ailleurs, bien que les pays du Sud ne soient encore concernés que marginalement par les mesures de réduction d'émission des gaz à effet de serre, l'évolution récente du contexte international vers la prise en compte du stockage de

carbone (dans les sols et les forêts, voire en fonction de pratiques agricoles) et la part non négligeable du méthane, puis de l'oxyde nitreux dans l'effet de serre d'origine anthropique amènent à prendre en considération cet aspect à court terme, au même titre que les préoccupations environnementales sur la qualité de l'eau ou la conservation des sols (C30).

On le voit, le changement climatique constitue un enjeu majeur pour les recherches conduites par un organisme de recherche tourné vers le développement durable au Sud comme le Cirad. Il importait de s'y attacher formellement. A l'échelle des systèmes de culture, le changement climatique impliquait un questionnement scientifique spécifique.

III.4.1.2 L'adaptation des agrosystèmes

Le changement climatique va modifier profondément le fonctionnement des écosystèmes naturels et cultivés sur la planète. La capacité d'adaptation des agrosystèmes à ce changement est ainsi devenue une question centrale posée à la recherche, récurrente dans les débats internationaux sur le changement climatique. Dans une communication à l'Académie d'Agriculture (AN7, C52), après avoir rappelé la nature des impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture à différentes échelles (plante, champ cultivé, terroir, écosystème), les différentes acceptions de l'adaptation ont été discutées, ainsi que les différents niveaux d'organisation à prendre en compte pour l'appréhender : pratiques agricoles, organisation des exploitations agricoles, ou encore échanges internationaux et politiques publiques. Chacune de ces échelles définit la nature et la gamme des adaptations possibles. Anticipation et réactivité doivent être distinguées, de même que différentes échelles de temps ; le temps long et le temps court s'imbriquant dans le fonctionnement des écosystèmes et des sociétés. Différents exemples ont permis d'illustrer des évolutions en cours ou de mettre en évidence des situations de particulière vulnérabilité. Ces questions ré-interrogent les disciplines de la recherche agronomique et nécessitent l'adoption de nouvelles démarches interdisciplinaires.

L'adaptation au changement climatique doit être considérée à différents niveaux d'organisation : elle concerne à la fois le niveau local, celui de l'agriculteur et de ses parcelles cultivées, et les niveaux national et international où s'expriment les politiques publiques. Elle se traduit donc par des réponses qui sont de différente nature, qui peuvent être de type technique, organisationnel ou encore politique (Smith et al., 2000). On peut alors définir un enchaînement de questions abordant successivement plusieurs niveaux d'organisation. Quelle adaptation technique est localement possible ? Que faut-il mettre en œuvre pour la faciliter ? Comment intégrer les échelles économiques, sociales et politiques ?

L'adaptation locale est d'abord celle de l'agriculteur : le système de culture se traduit par le choix des cultures et de leurs successions, le choix des variétés utilisées, le choix des dates de semis et des diverses opérations culturales, ainsi que des techniques de travail du sol. Ainsi, l'ajustement des techniques culturales au climat (par les dates d'implantation des cultures, le recours à la fertilisation, à l'irrigation, etc.) constitue de fait un premier niveau de réponse au changement du climat. Dans tous les cas, il s'agira d'optimiser un profit et/ou minimiser un risque dans un cadre modifié. La prise en compte des effets du climat sur la santé des plantes va conduire à une modification (une augmentation dans de nombreux cas) de l'emploi des pesticides et herbicides. L'utilisation d'un matériel génétique mieux adapté (précocité, durée du cycle, optimum thermique, besoins en froid, sensibilité au gel, etc.) constitue un autre niveau de réponse. Parmi les études de modélisation recensées par le GIEC, un petit nombre montre l'influence d'une adaptation des techniques culturales en terme de date de semis, choix variétaux, fertilisation ou irrigation avec comme objectif une augmentation des rendements ou une stabilisation de ces rendements entre années.

Pour les systèmes de cultures annuels, l'adaptation des techniques constitue le premier et principal ajustement au changement climatique et probablement la voie de recherche la plus pertinente. La plasticité des systèmes de grandes cultures et des systèmes fourragers peut être importante, en particulier dans les pays du Nord comme le montrent en Europe les effets très rapides des incitations économiques de la PAC (Politique Agricole Commune) sur le choix des espèces cultivées. On peut donc penser qu'en zones tempérées l'adaptation des cultures annuelles au changement climatique ne fera pas apparaître de problèmes critiques. Elle pourra être beaucoup plus difficile dans les pays du Sud, où le plus faible nombre de variétés adaptées à la nouvelle donne climatique, le caractère déjà limitant de facteurs climatiques comme la température, la difficulté d'approvisionnement en intrants (et, d'une manière plus générale, la mise en oeuvre de nouvelles technologies), rendront plus difficile l'adaptation des agrosystèmes. Ainsi, pour relativiser cette vision optimiste d'une capacité d'ajustement rapide (quelques années), il faut insister sur le caractère pluri-factoriel des effets du changement climatique (le changement climatique intervient sur l'ensemble des décisions à court et long terme de l'agriculteur), en soulignant une fois de plus les incertitudes actuelles sur la pluviométrie, grandeur clé du climat pour l'agriculture.

Mais l'adaptation devient plus difficile pour les systèmes de culture pérennes à base de plantes ligneuses dans un contexte de changement rapide du climat : les espèces qui sont choisies aujourd'hui pour peupler les massifs forestiers seront encore en croissance au milieu du XXI^e siècle, à un moment où la teneur en carbone atmosphérique et d'importants paramètres du climat seront modifiés. Pour les cultures pérennes, compte tenu de la durée de la période juvénile de mise en production, puis de la période de production (10-50 ans), l'adaptation ne peut se faire que sur le long terme. D'ores et déjà, devant les évolutions phénologiques constatées en Europe pour les arbres fruitiers, il faut se préoccuper maintenant de l'adaptation du matériel végétal. Quant à certaines cultures à forte typicité comme la vigne, elles posent des problèmes spécifiques, à cause de la prépondérance du facteur qualité appréhendé à travers la notion de terroir. Pour les forêts, le même problème d'adaptation des peuplements et de leur gestion est posé, encore amplifié par la longévité des arbres forestiers..La question du choix des essences et variétés utilisées pour la régénération des peuplements les plus exposés est posée, de même que le mode de conduite des peuplements en terme de mélange d'espèces et de classes d'âge. Il faut souligner que, dans les forêts déjà établies, la régénération naturelle des peuplements est le mode dominant de renouvellement. Dans ces conditions, le choix des essences ne peut bien sûr se faire que parmi les espèces déjà présentes, ce qui limite les possibilités. Favoriser les mélanges d'essences, plutôt que les peuplements monospécifiques, constitue une réponse adaptée (Seguin et al., 2004).

D'une manière générale, il apparaît nécessaire de concevoir des systèmes moins vulnérables, plus résilients, à même de s'adapter plus facilement aux changements. On peut faire l'hypothèse (bien que ceci constitue un thème de recherche à part entière), que les systèmes basés sur une forte diversité biologique (plusieurs espèces en interaction, couverture du sol permanente, etc.) disposent d'une capacité de résilience élevée sur le plan biologique (taux de matière organique des sols élevé, recyclage favorisé des éléments minéraux) et sur le plan social (systèmes multi-usages et multifonctionnels) . Ils minimiseraient aussi les émissions de gaz à effet de serre (utilisation plus modérée d'intrants) et favoriseraient la séquestration du carbone. Systèmes de culture, systèmes forestiers et systèmes d'élevage sont également concernés par ces questionnements, mais une vision globale s'impose pour les mettre au point. Par exemple, l'utilisation du bois comme ressource d'énergie constitue une option pertinente, efficace et durable, autre que le recours aux énergies fossiles, et qui réduit donc les émissions brutes de dioxyde de carbone. La biomasse fournit actuellement environ 15 % de l'énergie à l'échelle mondiale, bien davantage dans les pays en développement. Elle provient aujourd'hui surtout des résidus agricoles et forestiers, mais des perspectives importantes s'ouvrent aux « cultures énergétiques » qui produisent de la biomasse utilisée comme combustible. Le cocotier

présente par exemple le triple avantage de fournir via l'huile extraite du coprah un excellent substitut du fuel pour les moteurs diesel, de fixer du carbone et de rémunérer in fine les agriculteurs des zones marginales. Les systèmes agroforestiers, traditionnels des tropiques humides (dont le cocotier constitue l'un des composants, en particulier dans les zones littorales et insulaires marginales), pourraient ainsi révéler des capacités de résilience importantes. A l'inverse, certains agrosystèmes apparaissent aujourd'hui plus vulnérables et sont par ailleurs responsables de l'émission de quantités importantes de gaz à effet de serre. C'est le cas général des agricultures et monocultures intensives, fortes consommatrices d'énergies fossiles, d'engrais azotés et de pesticides.

Parallèlement à ces adaptations locales, qui requièrent une certaine plasticité, c'est aussi un déplacement géographique global des écosystèmes que l'on va observer, en relation avec le déplacement d'un certain nombre d'espèces animales et végétales, cultivées ou non, ainsi que de maladies, parasites et ravageurs. Ce déplacement sera « subi » par les écosystèmes naturels (migrations, extinction d'espèces), et plus ou moins accompagné pour les écosystèmes cultivés. Si les grandes lignes de ces évolutions commencent à être bien cernées dans les zones tempérées (voir Seguin et al, 2004 pour le territoire français), les études portant sur le domaine tropical sont moins nombreuses. Différentes études montrent toutefois le déplacement des zones de culture potentielles comme pour le café en Colombie.

Mais la capacité d'ajuster localement les pratiques culturelles dépend d'un grand nombre de facteurs qui dépassent largement le fonctionnement de l'exploitation agricole et engagent une collectivité bien plus large qui associe la société civile, les décideurs, et l'ensemble des partenaires de la recherche agronomique : à une autre échelle, les politiques publiques vont devoir jouer un rôle dans l'adaptation des agrosystèmes au changement climatique, en facilitant l'adoption d'innovations adaptées, en favorisant les adaptations locales aux modifications des échanges mondiaux de denrées, en développant une capacité à détecter les changements et à évaluer les possibles réponses.

III.4.2. Biodiversité et agrosystèmes

Les interactions entre biodiversité et agrosystèmes font l'objet d'un intérêt croissant parmi les écologues et les agronomes⁴² et ces interactions sont analysées sous des angles disciplinaires et des questionnements variés. Une première analyse pluridisciplinaire avec une économiste, Paule Moustier, m'a permis d'aborder le processus de diversification dans les agricultures du Sud, proposant première grille de lecture, sous des angles environnementaux et économiques (AN8, AN9). Mon intérêt s'est par la suite volontairement limité aux interactions à l'échelle des systèmes de culture, et porte principalement sur le rôle de la diversité biologique, en particulier les espèces végétales qui composent le système, dans la productivité et la stabilité du système. C'est un thème majeur pour l'UMR SYSTEM et il constitue l'ossature du projet de recherche qui sera proposé dans la partie suivante de ce mémoire. Du fait de leur complexité en terme de nombre et de type d'espèces en mélange, les systèmes agroforestiers en zone tropicale humide constituent des systèmes modèles pour aborder les relations entre diversité biologique et systèmes de culture (C56, C58, C60). Dans la continuation de la thèse de Nathalie Lamanda, je coordonne des travaux dans ce domaine au Cameroun (C63), en Guinée forestière (A16, C62, C65), au Costa Rica (C67, C68), au Vanuatu (C64). Des résultats significatifs ont déjà été obtenus (cf. les publications citées) qui seront repris partiellement dans le projet de recherche exposé ci-après. Ils contribuent et alimentent des propositions (C66) et des synthèses méthodologiques (A12, A13).

⁴² Ces interactions font bien sur également l'objet d'un intérêt pour d'autres disciplines en particulier dans le domaine des sciences sociales mais nous n'aborderons pas ici ces aspects

V. Conclusion

L'accélération des transformations agraires dans le monde, la montée des incertitudes, l'accroissement de la complexité des situations agricoles rendent plus que jamais nécessaire une meilleure intégration des connaissances entre disciplines et échelles d'approche des phénomènes. Dans le processus de « sectorisation » et de spécialisation toujours plus fort de la science, la nécessité de reconstruire un continuum logique entre différents domaines scientifiques est nécessaire dans une perspective d'appui au développement. En tant que discipline de synthèse et en tant que discipline pour l'action, l'agronomie doit jouer un rôle essentiel dans ce continuum. Ce point de vue, qui vise à préciser les contours d'une discipline, au moins dans un organisme comme le Cirad, et à proposer une vision systémique de la discipline, a été décrit dans le cadre d'un processus d'animation interne à l'Etablissement (**G3**). Au-delà des résultats originaux de recherche présentés dans ce chapitre, les fonctions de direction et d'animation de la recherche que j'ai eu à assumer au cours de ces 20 années consacrées à la recherche agronomique⁴³ m'ont amené à porter un regard sur l'agronomie en tant que discipline scientifique, et sur la manière dont cette discipline contribuait au développement durable. Il serait long d'en détailler ici les différentes facettes et l'on pourra se reporter à quelques écrits sur le sujet (B4, E1, E2, E3, G3, G4). Nous nous proposons de préciser cette vision dans notre Projet de Recherche, en nous intéressant plus particulièrement aux relations entre l'Agronomie et l'Ecologie.

A l'issue de cette présentation des résultats obtenus au cours de ces années de recherche, il importe néanmoins de revenir sur un certain nombre de lignes directrices –ou de ruptures– qui permettront de mieux éclairer les choix à venir. Il nous paraît important de revenir ici sur une démarche, celle de la modélisation, qui nous paraît centrale. De la connaissance à l'action, il existe différentes manières de mettre en œuvre de manière complémentaire les travaux de modélisation et de terrain, selon différents objectifs : diagnostiquer, évaluer, conduire, prédire, représenter, coordonner, etc. J'ai tenté d'approfondir cette vision dans un ouvrage (E3) qui fit suite à la tenue d'un colloque que nous avons organisé en 2000 avec mes collègues géographe et mathématicien, Guy Trébuil et Marc Jaeger. En voici quelques éléments :

Confrontée à de nouveaux enjeux, l'agronomie évolue vers une prise en compte plus globale de l'ensemble de l'écosystème. Il s'agit non seulement d'élaborer les bases scientifiques du fonctionnement des agroécosystèmes, mais aussi de construire de nouvelles méthodes et des outils adaptés pour aider des acteurs multiples à gérer les ressources du milieu, avec des objectifs qui se diversifient, se complètent et parfois même divergent. Ces approches, méthodes et outils doivent intégrer les avancées récentes des sciences agronomiques comme les acquis des sciences humaines, prendre appui sur les mathématiques et sur les progrès rapides de l'informatique et des technologies de l'information. Face à cette complexité croissante, la modélisation jouera un rôle central. Du peuplement végétal au champ cultivé, de l'exploitation agricole au territoire, différents types et degrés d'interdisciplinarité sont mis en œuvre et proposés, des sciences biophysiques aux sciences de gestion, pour mieux appréhender dynamiques agroécologiques et socioéconomiques.

Bien sur on dépasse ici les limites de l'agronomie systémique sensu stricto que je me suis employé à mettre en œuvre dans mes recherches personnelles. Dans ce cadre là, j'ai toutefois tenté d'aller au-delà des limites d'une vision centrée sur le fonctionnement d'un agrosystème limité au partage de ressources dans un peuplement homogène et, comme nous avons pu le voir dans ce chapitre, j'ai été amené à proposer d'autres modèles, en particulier pour mieux intégrer la notion d'hétérogénéité au sein

⁴³ Voir la première partie de ce mémoire

des systèmes de culture. C'est cette voie qui sera poursuivie dans le Projet de Recherche proposé dans la partie suivante.

TROISIEME PARTIE

Projet de recherche

Les agrosystèmes doivent-ils imiter les écosystèmes naturels ?

Perspectives de recherche entre agronomie et écologie et implications pour le concept de système de culture

Préambule

Les perspectives de recherche dessinées ici se situent dans un cadre conceptuel et méthodologique volontairement nouveau, à l'interface entre écologie et agronomie. Elles se sont bâties sur l'expérience acquise, sur les résultats produits, et sur un certain nombre de constats sur l'évolution actuelle de ces deux disciplines. Sur le plan institutionnel et organisationnel, elles s'inscrivent dans les nouvelles directions proposées par et pour l'UMR SYSTEM, et plus particulièrement à travers l'axe 2 que j'anime dans cette unité, axe bâti autour des relations entre l'agronomie systémique et l'écologie fonctionnelle.

Centrées sur la question du rôle de la diversité biologique cultivée dans la productivité et la stabilité des systèmes de culture, ces nouvelles perspectives proposent plusieurs niveaux d'intégration, en termes disciplinaires d'abord, entre l'agronomie et l'écologie, mais aussi en terme de niveaux d'organisation et d'échelles. Bien que positionnées prioritairement sur le champ cultivé, elles vont nécessiter la prise en compte d'échelles plus englobantes, au delà de la parcelle cultivée et jusqu'au paysage, vu comme une combinaison de systèmes dans un espace. L'utilisation des cadres conceptuels et méthodologiques de l'écologie fonctionnelle puis, dans une moindre mesure, de l'écologie du paysage, sont mobilisés, pour aborder l'analyse du fonctionnement d'agrosystèmes tropicaux et leur durabilité.

En terme de modèle (système) d'étude, on propose de s'intéresser de manière privilégiée à des systèmes complexes que sont les systèmes agroforestiers traditionnels des zones tropicales humides. On s'interrogera sur les conditions de la productivité et de la durabilité écologique de ces systèmes.

Les actions de recherche proposées dans ce cadre seront conduites en synergie avec mes autres activités dans le domaine de l'animation et de la gestion de la recherche, en particulier :

- La participation à la direction de l'UMR (directeur adjoint)
- l'animation de l'axe 2 de l'UMR qui porte sur le rôle de la diversité biologique sur les performances et la stabilité des fonctions des systèmes plurispécifiques
- la direction de l'équipe PERSAFT (Performances des systèmes agroforestiers tropicaux) de l'UMR
- la direction de thèses en démarrage dans ce contexte (dans l'équipe et dans d'autres équipes du Cirad en particulier)

I. Un projet de recherche intégré dans le projet scientifique de l'UMR SYSTEM

L'analyse et la modélisation des liens entre la diversité biologique des espèces cultivées en mélange et les performances agronomiques ou les impacts environnementaux de ces systèmes constituent le cadre général des travaux conduits dans l'axe 2 de l'UMR SYSTEM (Voir l'organigramme de l'Unité dans la Première Partie de ce mémoire). Nous faisons l'hypothèse que cette diversité biologique peut, dans certaines conditions, favoriser la productivité et la résilience du système. La complexité du

système (au sens où celle-ci correspond à un indice de diversité biologique plus élevé) pourrait ainsi favoriser sa stabilité, accroître sa capacité de récupération et d'homéostasie. L'axe 2, centré sur le rôle de la diversité biologique cultivée dans la productivité et la stabilité des fonctions du champ cultivé plurispécifique, a pour objectif de produire les connaissances et les modèles permettant de décrire, comprendre et simuler, de manière systémique, le fonctionnement d'un champ cultivé c'est à dire un ensemble d'éléments biologiques et physiques en interaction et soumis aux interventions d'un « pilote ». Alors que de nombreux acquis permettent aujourd'hui de décrire de manière mécaniste les processus qui régissent le fonctionnement d'un couvert végétal monospécifique vu comme un ensemble homogène, les méthodologies et les outils qui permettent de rendre compte du fonctionnement d'un ensemble plurispécifique hétérogène restent en effet peu nombreux, éparés, et souvent mal adaptés (Nair, 2001). Leur nombre se réduit encore si l'on s'intéresse au pas de temps long de l'évolution des systèmes, la plupart des études visant à caractériser le fonctionnement d'un couvert à la structure établie. Nous nous proposons donc de mobiliser, outre les méthodes et outils de l'agronomie, ceux de l'écologie fonctionnelle qui se révéleront adaptés pour aborder les questions et systèmes abordés.

Nous avons collectivement proposé dans l'Unité que l'axe 2, qui a pour vocation de regrouper des agronomes pour favoriser leur dialogue avec des écologues, soit structuré par une question transversale portant sur les propriétés émergentes des systèmes pluri-spécifiques :

Quel est le rôle de la diversité biologique cultivée dans la productivité et la stabilité des systèmes de culture pluri-spécifiques ?

Cette question peut se décliner par ailleurs en deux questions complémentaires, aux débouchés directement appliqués en terme de conception des systèmes de culture : Pourquoi et dans quelle mesure introduire de la diversité dans les systèmes de culture spécialisés ? et, à l'inverse, comment augmenter la productivité des systèmes de culture multi-spécifiques tropicaux traditionnels ?

La réponse à ces questions suppose la conception d'outils spécifiques de représentation de cette diversité biologique et de ses liens avec le fonctionnement du système, outils le plus souvent inexistants. La mise au point et l'ajustement des systèmes de culture passent en effet par une phase d'optimisation souvent complexe, qui nécessite le recours à la modélisation comme outil exploratoire. Une autre question, de nature méthodologique, s'impose donc : comment représenter et simuler le fonctionnement et la dynamique des systèmes de culture plurispécifiques ?

Dans un système plurispécifique, les performances agronomiques dépendent en partie du partage des ressources entre les différentes espèces présentes, intégrant différents processus de compétition mais aussi de facilitation (A13). Les conditions de succession des espèces dans le temps constituent un autre aspect qui conditionne les performances agronomiques des systèmes mais aussi leur stabilité et leur résilience. A partir des travaux engagés dans les différents programmes de l'unité depuis 2002, nous avons ainsi proposé de restreindre nos questionnements aux deux domaines suivants :

- le partage des ressources et les performances agronomiques des systèmes plurispécifiques;
- les interactions entre la dynamique de la biocénose et la stabilité des systèmes plurispécifiques.

Ces deux thèmes recouvrent deux types de processus qui doivent être abordés conjointement mais avec des pas de temps souvent différents qui peuvent aller de la journée (partage des ressources) à plusieurs dizaines d'années (dynamique des espèces). L'animation du premier thème dans l'unité a été confiée à Christian Dupraz (INRA). Il m'a été confié l'animation du second thème que j'aborderai donc

dans ce qui suit. Dans le cadre de l'axe 2 de l'Unité, ces questions sont abordées sur une variété de systèmes, comme la vigne enherbée, les systèmes agroécologiques multispèces à base d'annuelles (SAMBA)⁴⁴, les peuplements enherbés, l'agroforesterie méditerranéenne (association d'un ligneux comme le noyer ou le peuplier et d'une culture annuelle comme le blé) et, enfin, les systèmes agroforestiers complexes en zone tropicale humide⁴⁵.

C'est dans le cadre de l'équipe Performances des Systèmes AgroForestiers Tropicaux (PERSAFT) de l'UMR SYSTEM que je dirige que s'inscrit mon Projet de Recherche.

II. Vers une agronomie des systèmes de culture plurispécifiques, appliquée aux systèmes agroforestiers complexes

II.1. Introduction

Depuis plusieurs années, l'agronomie, science finalisée qui a pour objet les agrosystèmes, voit émerger de nouveaux paradigmes qui bousculent, de manière plus ou moins profonde, ses fondements traditionnels. L'un de ces nouveaux paradigmes consiste à rechercher les clés de la durabilité des agrosystèmes à travers la conception de systèmes de culture dont la structure et le fonctionnement s'apparentent –réellement ou prétendument- à des systèmes écologiques observables dans la Nature. L'agriculture, mimant ou calquant les écosystèmes naturels, devient une *nouvelle* agriculture, en rupture avec l'agriculture moderne, une agriculture sensée permettre de produire des denrées sans risque de contamination chimique, de conserver les sols et la biodiversité, tout en limitant le recours aux énergies fossiles. Dépassant le cercle restreint des milieux scientifiques, ce nouveau paradigme se développe aujourd'hui dans le monde du « développement », chez les agronomes et ingénieurs chargés de concevoir de nouveaux systèmes de culture, et chez certains agriculteurs et experts agricoles, soucieux de (re)trouver une agriculture moins « productiviste » et plus « naturelle ». La rupture avec l'agriculture productiviste prend des formes diverses, de l'adaptation de pratiques existantes au rejet plus ou moins radical de toute forme d'intensification. Allant bien souvent au delà d'une agriculture « raisonnée »⁴⁶, ces nouvelles pratiques s'illustrent par exemple à travers la promotion active de l'« agriculture biologique », ou de l'agriculture dite « de conservation ». Initié à l'origine dans le contexte des agricultures intensives des pays du Nord, ces changements de paradigme concernent également les agricultures des pays en développement. Pourtant, dans de nombreuses situations, encore souvent traditionnelles, ces dernières n'ont pas connu l'importante et décisive augmentation de la productivité de la terre et du travail consécutive à la mécanisation et à l'emploi d'intrants chimiques.

Réaction de rejet face aux excès de l'agriculture intensive, ou source d'un véritable renouveau, quels sont les fondements scientifiques de ces nouveaux paradigmes basés sur l'« imitation » (mimic, en anglais) des écosystèmes naturels? Sur quelles bases scientifiques reposent ces nouvelles « visions »

⁴⁴ dénomination générique pour un ensemble de systèmes de culture associant un ensemble de pratiques consistant à maintenir une couverture du sol permanente au moyen de mulchs vivants (plantes de couverture) ou morts (pailles) et à réduire au minimum le travail du sol. La succession d'espèces différentes est aussi un élément essentiel de ces systèmes.

⁴⁵ Chaque type de système fait l'objet d'une organisation en équipe au sein de l'Unité

⁴⁶ L'agriculture raisonnée consiste en un ensemble de pratiques visant à la diminution de l'utilisation des intrants chimiques, par une optimisation de leur usage. Adaptées au cas par cas, ces pratiques ne remettent pas nécessairement en cause les itinéraires techniques et successions culturales pratiqués mais visent à diminuer leurs impacts négatifs sur l'environnement.

de l'agriculture, qui proposent de s'appuyer sur une nouvelle discipline, l'agroécologie⁴⁷ ? Ces nouveaux paradigmes sont-ils en mesure de faire évoluer significativement et positivement nos démarches de recherche, ou relèvent-ils d'une simple idéalisation face au Naturel ? Nous aborderons ici ces différentes questions qui interpellent la communauté scientifique des agronomes et remettent en cause, parfois profondément, les bases disciplinaires traditionnelles de l'agronomie. Nous tenterons de montrer comment agronomie et écologie peuvent et doivent interagir, avec pour corollaire la nécessité de faire évoluer le concept de système de culture pour faire face à ces nouveaux questionnements. Nous proposerons des hypothèses et pistes de recherche et formulerons des propositions à mettre en œuvre dans le cadre de nos recherches.

II. 2. Contexte, objectifs et bases scientifiques

II.2.1. Des agricultures dans l'impasse

Si la fonction initiale (et longtemps reconnue comme principale) de l'agriculture est d'assurer la sécurité alimentaire d'une société, les activités agricoles assurent en fait, directement ou indirectement, de nombreuses autres fonctions dont l'importance dans certaines sociétés dépasse aujourd'hui de loin cette fonction nourricière initiale. C'est le cas en particulier en Europe, où les fonctions environnementales et sociales de l'agriculture, dans ses conséquences positives ou négatives sur les écosystèmes et le bien-être des sociétés ont désormais largement supplanté la fonction de production de nourriture, de fibre ou d'énergie du moins dans les priorités des populations et des décideurs. Les fonctions économiques et sociales de l'agriculture restent importantes dans les sociétés du Nord comme du Sud, mais dans un débat aujourd'hui largement dominé par un contexte où le rapport entre les villes et la campagne a profondément évolué. Dans les pays du Sud, la fonction nourricière de l'agriculture – et son rôle économique et social associé- demeure pourtant au centre des préoccupations premières de la majeure partie de la société. L'augmentation prévue de 3 milliards d'habitants supplémentaires sur la planète d'ici 2050 –et donc la nécessité d'augmenter de manière durable la production de denrées agricoles- contribuera certainement à faire conserver à l'agriculture ce rôle nourricier originel (Evans, 1998). Dans le même temps, la pression accrue sur les ressources naturelles, qui occasionne pollutions diverses et pertes de biodiversité, oblige souvent à revoir les modes de gestion actuels de ces ressources naturelles, souvent non durables (Brown *et al.*, 2000). Ainsi, dans tous les cas, et quel que soit le cadre géographique et social que l'on considère, l'agriculture ne peut plus se résumer aujourd'hui à l'une de ses fonctions, mais associe étroitement fonctions de production, fonctions écologiques, économiques et sociales. Directement ou indirectement, l'activité agricole se situe nécessairement au cœur du rapport entre nature et sociétés, et, à ce titre, assure un triple rôle environnemental, économique et social.

Privilégiant la fonction de production végétale et animale, et surtout son efficience économique, le schéma productiviste –qui privilégie la fonction de production- s'est longtemps imposé au détriment d'autres fonctions considérées alors comme secondaires. L'agronomie, répondant à la demande dominante, a longtemps contribué à appuyer ce schéma productiviste dominant, largement suivi en Europe, en Amérique du Nord, ou dans les pays de l'Est.

Les cultures intensives, de céréales en particulier, ont permis l'obtention de gains énormes de productivité au cours des 20 dernières années, à travers les progrès de la révolution verte. Ces cultures –souvent des monocultures- constituent aujourd'hui l'un des piliers de la sécurité alimentaire et du

⁴⁷ Lire Altieri (1995, 2002); Dalgaard *et al.* (2003)

commerce agricole mondial. Celle-ci repose pourtant souvent sur un lourd bilan environnemental. La contamination de l'environnement par les engrais et les pesticides, la perte de diversité génétique des cultivars locaux, la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, l'érosion des sols ont souvent accompagné une augmentation relative de la productivité, et un bilan social parfois négatif. A la même époque, ce schéma a également orienté le développement de l'agriculture tropicale de plantation, basé sur l'exportation de denrées brutes ou transformées. C'est le modèle intensif des grandes plantations de plantes pérennes cultivées en monoculture comme le palmier à huile et l'hévéa ou semi-pérennes comme la bananier et l'ananas. La Révolution Verte, fidèle à ce schéma reposant sur l'emploi de variétés nouvelles performantes et le recours à l'emploi massif d'intrants chimiques, a permis dans les années 70 les augmentations de productivité nécessaires pour nourrir une population mondiale en forte croissance. La prise de conscience des limites de la course à la productivité est apparue dès les années 70 en Europe. En Afrique, les échecs rencontrés par la révolution verte en zone semi-aride, la baisse fréquente des nappes phréatiques, la pollution des eaux par les intrants chimiques, la salinisation des sols, ont, dans de nombreux cas, montré les limites de ces systèmes basés sur l'intensification (Conway, 1998). L'agriculture « moderne » intensive, du type de celle des pays du Nord, grande consommatrice d'énergie, d'engrais minéraux et de pesticides et aujourd'hui remise en cause, ne touche pourtant qu'une frange marginale des populations des pays du Sud. Environ 80 % des agriculteurs d'Afrique, 40 à 60 % de ceux d'Amérique Latine et d'Asie travaillent aujourd'hui uniquement avec des outils manuels, et seulement 15 à 30 % d'entre eux disposent de la traction animale (Mazoyer et Roudart, 1997). C'est dire l'importance, encore aujourd'hui, des systèmes de culture traditionnels, dont certains, comme les systèmes de culture sur abattis-brûlis⁴⁸, répandus depuis l'époque néolithique et encore largement pratiqués, dans l'équilibre alimentaire global. Aujourd'hui, le rapport de la productivité du travail entre l'agriculture la plus intensive et celle la plus extensive est de 1 à 500 (il n'était que de 1 à 10 au début du 20^{ème} siècle) (Mazoyer et Roudart, 1997).

Face à ce constat, de nouvelles voies conceptuelles pour construire des agroécosystèmes durables sont recherchées. La diversification des cultures au sein des exploitations agricoles est une problématique ancienne mais toujours d'actualité, redevenue essentielle pour aborder la durabilité écologique, économique et sociale des agrosystèmes (Connor, 2001). Les paysans du Sud (plus d'un milliard) restent aujourd'hui encore à l'écart des technologies modernes de l'agriculture. Paradoxalement, leurs systèmes traditionnels, basés sur une gestion intégrée des ressources naturelles locales, et, dans de nombreux cas, sur une gestion raisonnée de la biodiversité pourraient-ils constituer des modèles pour les systèmes de culture de demain ? C'est l'hypothèse avancée aujourd'hui par certains agronomes (Ewel, 1999; Altieri, 2002; Jackson, 2002). Ainsi, dès les années 80, de nouveaux modèles sont proposés, basés sur des formes plus ou moins radicales d'« agriculture biologique » (Cauderon, 1981). Le cadre proposé récemment par le concept d'agriculture multifonctionnelle a mis en exergue les différentes fonctions de l'agriculture, et, en premier lieu, les fonctions environnementales que l'agriculture peut jouer. Le débat récent sur la biodiversité a renforcé et donné une dimension supplémentaire au débat. La création d'espace pour la vie sauvage dans les territoires agricoles est ainsi également devenue un objectif en soi (McNeely et Sherr, 2003). Différentes stratégies peuvent être poursuivies dans cet objectif comme i) la création de réserves de biodiversité qui bénéficient aux communautés locales, ii) le développement d'un réseau d'habitats dans les aires non cultivées, iii) la limitation de l'extension des aires cultivées par un accroissement de la productivité. Mais ces stratégies peuvent être complétées par l'augmentation de la valeur écologique (en terme d'habitat) des aires cultivées. Celle-ci passe prioritairement (Sherr, 2007) par :

⁴⁸ Systèmes de culture caractéristiques des zones tropicales humides basés sur l'installation de cultures après abattis et brûlis d'une forêt, le plus souvent secondaire. La période de rotation complète qui comprend la période de culture suivie du rétablissement de la friche boisée varie d'une dizaine à une cinquantaine d'années.

- la diminution de la pollution d'origine agricole
- la modification des pratiques de gestion du sol, de l'eau et des ressources végétales,
- la recherche de systèmes de culture « imitant » les écosystèmes naturels

Ce nouveau cadre, qui s'inscrit dans la continuité de celui tracé par Conway (1997) nous invite ainsi aujourd'hui à revoir certains paradigmes de l'agronomie, à mieux prendre en compte certains processus écologiques, et, pour ce faire, à construire de nouveaux outils méthodologiques. Cette évolution de la nature des relations entre agriculture et ressources naturelles entraîne un renouvellement nécessaire des paradigmes et outils de l'agronomie, une nouvelle vision des relations entre les disciplines qui s'adressent au fonctionnement des écosystèmes. Comment opérer ce renouvellement ? Quels liens tisser avec l'écologie, science des écosystèmes, pour des solutions à de nouveaux problèmes ?

II.2.2. Questionnements et interactions entre les disciplines de l'agronomie et de l'écologie

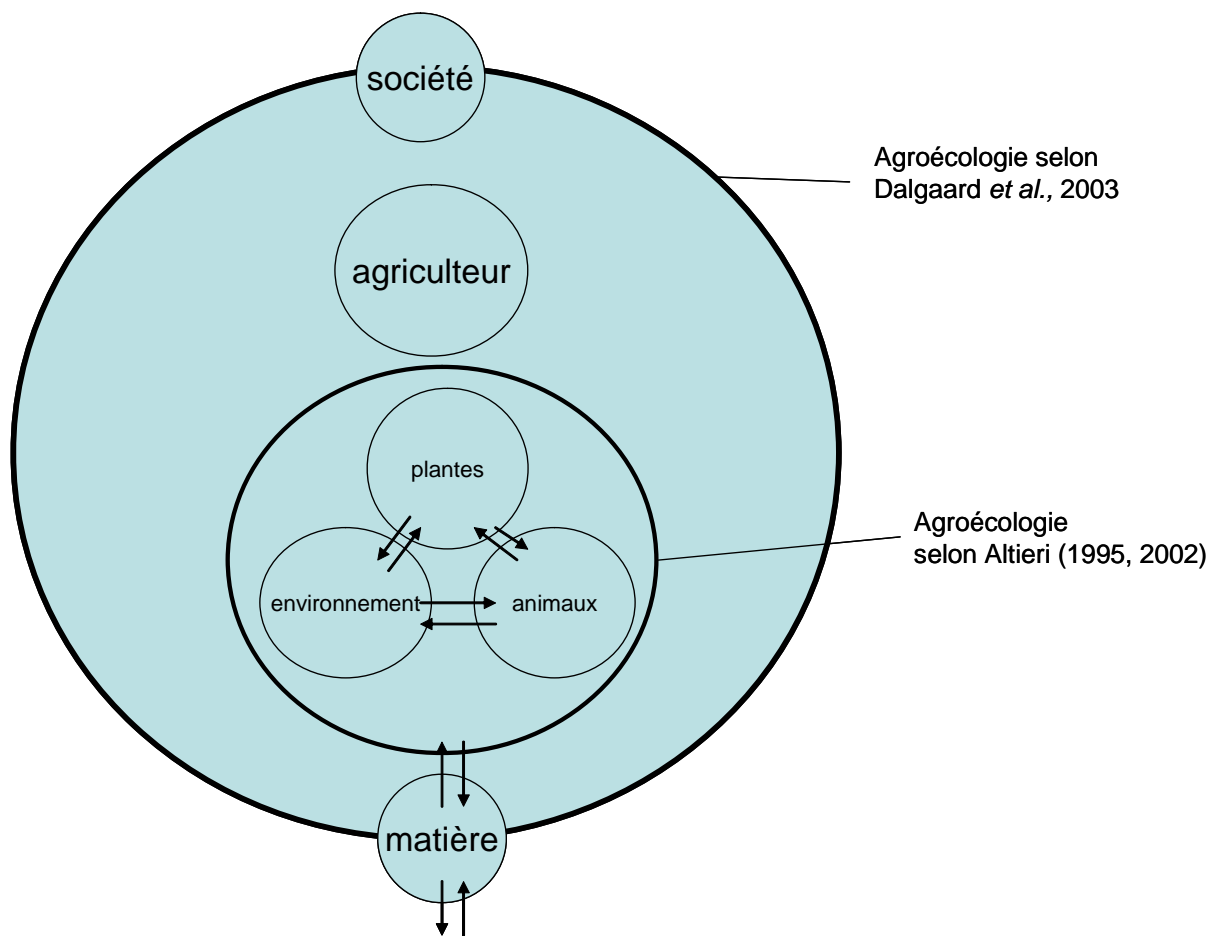
L'agronomie est souvent accusée d'avoir favorisé l'émergence d'agricultures polluantes. Parmi les différentes raisons invoquées, certaines sont à rechercher dans les origines même de la discipline. L'une d'elle tiendrait au fait que l'agronomie est une discipline issue de l'essor de la science « positiviste », prolongement des idées de Descartes, dont l'avènement a largement privilégié le développement de technologies « dures » aux dépens d'approches holistiques (Hole), aux solutions supposées plus « douces ». On voit ainsi s'opposer les valeurs qui ont fondé la Science « atomiste, déterministe, universaliste », aux valeurs « holistes, pluralistes, contextualistes » pour reprendre l'opposition proposée par Altieri (1987). Mais l'écologie est-elle véritablement une science holistique ? Bien que E.P. Odum (1997) l'ait soutenu et argumenté, ce n'est pas l'avis de Blandin et Bergandi (2003) qui soulignent, eux, la prédominance des approches réductionnistes dans la production scientifique des écologues, reléguant l'analyse des « propriétés émergentes » des systèmes complexes⁴⁹ à un domaine secondaire. L'observation de l'évolution des idées en écologie montre en effet que la science de l'écologie a elle-même aussi longtemps été et est toujours largement dominée par une forte segmentation disciplinaire, finalement peu propice aux approches écosystémiques holistiques (Deléage, 1991). L'écologie serait ainsi tiraillée entre deux exigences contradictoires. Une première exigence, où les niveaux d'analyse (individu, population, communauté, écosystème) sont séparés et font l'objet d'approches et de méthodes distinctes ; on distingue ainsi explicitement l'écologie des populations et l'écologie des écosystèmes, cette dernière étant plus marquée par l'étude des cycles de matière et d'énergie. Une seconde exigence vise au contraire à l'intégration entre ces niveaux et disciplines grâce à des avancées conceptuelles et théoriques situées à la charnière entre disciplines

⁴⁹ Un système complexe peut être défini comme un système composé de nombreux éléments différenciés interagissant entre eux de manière non triviale (interactions non-linéaires, boucles de rétroaction, etc.). Un système complexe se caractérise par l'émergence au niveau global de propriétés nouvelles, non observables au niveau des éléments constitutifs, et par une dynamique de fonctionnement global difficilement prédictible à partir de l'observation et de l'analyse des interactions élémentaires. En particulier, un système complexe typique a un comportement holistique qui rend vaine toute tentative d'analyse par une découpe en sous-systèmes plus simples. Le champ des applications de la théorie des systèmes complexes est extrêmement vaste : il touche de larges secteurs de la physique, de la biologie (système gènes-protéines, système immunitaire, systèmes écologiques, etc.), l'ensemble des sciences cognitives et l'ensemble des sciences humaines et sociales. (extrait de la présentation du Cycle de conférences « Systèmes complexes en Sciences Humaines » organisé par l'Institut International Erasme (MSH, Université Lille 3) en 2005)

(dynamique des populations, évolution, cycle des nutriments, flux énergétiques), étape dont l'objectif est la compréhension globale du fonctionnement de l'écosystème (Barbault, 1997). Approches réductionnistes ou holistes, l'écologie est donc aussi confrontée à des forces centrifuges (Lévêque, 2001). L'agronomie connaît, depuis le début du siècle, des débats similaires, et une histoire comparable. Dans la pratique agronomique classique, le champ cultivé est ainsi décrit en termes de compartiments et de flux, à l'instar de l'écosystème en écologie. Loin de l'approche holistique, c'est l'approche réductionniste, qui isole les différents éléments constituant du système, qui prédomine aussi, isolant nombre de disciplines et sous-disciplines. Les dialogues entre science du sol, écophysiologie et agronomie systémique se distendent peu à peu tant outils, méthodes et surtout objectifs diffèrent.

Comme l'agronomie, l'écologie contribue à redéfinir en permanence les rapports de la société avec la nature, et modifie dans le même temps ses propres rapports avec la société. Si l'agronomie fut longtemps inféodée au paradigme productiviste, l'écologie scientifique fut elle très tôt piégée par le discours politique, se tenant ainsi volontairement à l'écart des questions posées par le développement. L'écologie a longtemps tenu l'homme à l'écart, soit parce qu'elle ne s'adressait qu'aux écosystèmes naturels, soit parce qu'elle considérait l'homme comme une « boîte noire » externe ou comme un « facteur » perturbant ce système. En 1997, E.P. Odum proposait un modèle hôte-parasite pour définir la relation de l'homme avec la biosphère. Mais l'écologie est aujourd'hui confrontée, tout comme l'agronomie, aux impératifs du développement durable. Les agronomes pouvaient bien sur difficilement adopter cette posture consistant à reléguer l'homme à l'un des compartiments du système. Pourtant, dans le domaine agronomique, la fracture est aussi réelle entre les approches biophysiques où l'homme reste un facteur extérieur et les approches sociales où l'homme, devenu cette fois acteur, évolue dans un espace biophysique neutre non ou peu représenté, espace devenu à son tour « facteur ». Nous reviendrons plus tard sur ces oppositions et les tentatives pour les résoudre.

Chercher à opposer agronomie et écologie serait vain tant les points de rapprochement et d'enrichissement réciproques sont nombreux. Dès de le XIXème siècle, c'est Liebig, agrochimiste, qui, en 1845, jeta les bases de la compréhension des cycles biogéochimiques. Inversement, c'est un champ de maïs de l'Illinois qui sert à Transeau en 1926 de base à l'établissement du premier bilan énergétique d'un écosystème (Deléage, 1991). Pourtant, depuis, les cheminements furent le plus souvent séparés et les rapprochements peu nombreux. L'agronomie reste marquée par la symbolique de la domination de l'homme sur la nature, alors que l'écologie reste, elle, parée de tous les atouts de l'harmonie entre l'homme et la nature. Si le dialogue entre science et ingénierie est ancien et inhérent à l'agronomie depuis ses débuts (« l'agronomie, science de l'action »), il est plus récent chez les écologues, plus réticents à admettre et considérer la place de l'homme dans les écosystèmes et envisager leur interaction. Le contexte français a certainement accentué cette dualité, l'écologie restant le domaine de l'Université et l'agronomie, science de l'ingénieur, l'apanage des grandes Ecoles de l'enseignement agronomique. Aujourd'hui, l'ingénierie écologique, telle que proposée par Barbault (2001), quitte le champ strictement cognitif de l'écologie scientifique et vise, au delà de la production de technologies « éco-compatibles », au contrôle et au pilotage de systèmes naturels ou modifiés par l'homme, dans le cadre d'un développement durable. Il est clair que ces évolutions ouvrent la voie à de fructueux dialogues entre agronomes et écologues.



Les domaines de l'agroécologie selon Altieri (1995, 2002) et Dalgaard *et al.*, 2003).
Schéma d'après Dalgaard *et al.*, 2003.

En fait, le rapprochement entre écologie fonctionnelle et recherche agronomique a été amorcé il y a une trentaine d'années (Hart, 1986), mais n'a été formalisé que très récemment (Lefroy et al, 1999). Ce rapprochement se fonde sur le paradigme selon lequel les écosystèmes naturels sont durables et adaptés aux contraintes locales (Dawson et Fry, 1998). En incorporant dans les agrosystèmes cultivés certaines caractéristiques des écosystèmes naturels, on peut espérer leur conférer certaines propriétés intéressantes telles que productivité (Fukai, 1993), stabilité (Aerts, 1999; Schulte et al, 2002), résilience, notamment vis à vis des attaques de ravageurs (Trenbath, 1993), efficacité énergétique dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles (Hatfield, 1997), et *in fine* durabilité. On peut surtout rechercher des compromis entre ces différentes propriétés. Altieri (1995, 2002) et Gliessmann (1990) ont récemment formalisé ces rapports entre agronomie et écologie à travers la proposition d'une nouvelle discipline, l'agroécologie. Dalgaard *et al.* (2003) ont récemment étendu les contours de cette nouvelle discipline proposée en y associant des éléments des sciences de l'économie et de la sociologie. Pour certains, se plaçant dans une logique d'action sociale voire politique, il s'agit de mettre en oeuvre un véritable modèle de développement faisant vivre un idéal démocratique par la participation d'une plus grande diversité d'acteurs (Warner, 2006). La figure 0 schématise ce cadre conceptuel et disciplinaire de l'agroécologie. Alors que les disciplines l'agronomie et l'écologie sont mobilisées par Altieri, les dimensions économiques et sociales proposées par Dalgaard et al. (2003) élargissent considérablement le cadre disciplinaire.

Approfondir cette perspective historique sur l'évolution du champ agronomique et agroécologique n'est pas ici notre objet⁵⁰, nous chercherons plutôt dans ce qui suit à nous inscrire de manière opérationnelle dans cette dynamique en **nous limitant à approfondir les rapprochements potentiels entre agronomie et écologie pour une évolution des recherches sur les systèmes de culture**. Le chapitre suivant offre un premier exemple.

II.2.3. Du modèle conceptuel de la forêt au système de culture agroforestier

Aujourd'hui, écosystèmes naturels et écosystèmes cultivés exigent des approches convergentes vis à vis de l'analyse de leur fonctionnement et de la prise en compte de leurs impacts, qu'ils soient positifs ou négatifs. En effet, malgré leurs différences, écosystèmes naturels et cultivés relèvent des mêmes processus. Les ressources bio-physiques de l'agriculture sont les mêmes que celles des écosystèmes naturels : énergie, eau, sol, organismes vivants, etc. Le but premier de l'agriculture est de gérer ces ressources afin d'en obtenir des produits utiles à l'homme. Seules les ressources socio-économiques et cognitives (travail, capital, pratiques, connaissance, information, etc.), outre le dessein lié à l'anthropisation, fondent la différence essentielle entre écosystèmes naturels et cultivés.

II.2.3.1. Les systèmes agroforestiers : un modèle de transition

Quelle est la validité du modèle représenté par la forêt naturelle pour concevoir des systèmes de culture ? Selon Ewel (1999), les écosystèmes tropicaux humides seraient particulièrement adaptés à l'application de ce concept « d'imitation de la Nature ». Conçus sur le modèle de la forêt tropicale multistratifiée, les systèmes agroforestiers, très répandus en zone tropicale humide et subhumide, assurent ainsi à la fois la subsistance des populations locales et d'importantes fonctions environnementales et socio-économiques (Sanchez, 1995; Nair, 2001). Entre *ager* et *sylva*, les systèmes agroforestiers combinent espèces annuelles et pérennes, herbacées et ligneuses, selon un ensemble de pratiques plus ou moins complexes (Torquebiau, 2000). Les systèmes agroforestiers sont

⁵⁰ Lire à ce sujet Robin et Aeschlimann (2006)

des systèmes cultivés qui associent plusieurs strates (au minimum une strate arborée à une strate herbacée), et qui incorporent une diversité spécifique souvent élevée. Ils représentent donc une cible de choix dans une démarche de transposition des acquis de l'écologie vers l'agronomie (Sanchez, 1995 ; Nair, 2001). Les systèmes agroforestiers ne sont pas une spécificité tropicale : ils étaient très répandus dans les zones tempérées et méditerranéennes avant l'introduction de la mécanisation. Dans les zones tropicales, ils constituent aujourd'hui le support essentiel de très nombreuses petites exploitations familiales. Ils font l'objet d'un intérêt croissant de la communauté scientifique internationale (ICRAF, 2000), et des itinéraires techniques agroforestiers modernes compatibles avec l'intensification et la mécanisation sont maintenant évalués, aussi bien en zone tempérée qu'en zone tropicale.

A titre d'exemple de système agroforestier en zone tropicale humide, les agroforêts à damar de Sumatra, décrites par Michon *et al.* (1995), représentent une voie originale d'usage des ressources naturelles par des communautés paysannes, basée sur la reconstruction, par l'homme, d'un écosystème à la fois « naturel » et productif. L'agroforêt à damar, qui comprend de nombreuses espèces utiles, atteint in fine un état « stabilisé » proche d'un écosystème forestier naturel. Celui-ci met pourtant plus d'un demi-siècle à se construire, au terme d'une gestion progressive comprenant plusieurs phases : ouvert sur d'anciennes jachères, l'implantation des jeunes plants de damar fait suite à plusieurs cycles de riz pluvial et à l'implantation de poivriers. Après une vingtaine d'années, les damars se développent au sein d'une végétation secondaire, de plus en plus diversifiée, spontanée ou favorisée. Il est important de souligner ici que, paradoxalement, c'est la reconstitution de l'écosystème forestier qui a permis la maîtrise du cycle de la plante et son exploitation, contournant ainsi les difficultés de la culture du damar en pratique forestière intensive, inhérentes à sa biologie (faible fructification, mauvaise régénération, entrée en production tardive, etc.). C'est en reconstituant progressivement un milieu favorable, adapté à la biologie des différentes plantes, qu'a été rendue possible l'exploitation des différentes espèces utiles. En matière de biodiversité, les agroforêts à damar atteignent un niveau de biodiversité de l'ordre de 50 % de celui observé dans les forêts naturelles présentes à proximité (comparaison du nombre d'espèces présentes parmi les grands groupes biologiques : arbres, arbustes, lianes, herbacées, épiphytes), ce qui peut paraître considérable, en tous cas, largement plus que tout autre système agricole ou de plantation. Il en est de même lorsque l'on observe la biodiversité animale. Des cas similaires sont observés dans d'autres régions du monde, qui confèrent des propriétés génériques aux systèmes agroforestiers humides.

II.2.3.2. Pratiques agroforestières et fonctions

Comme indiqué dans l'exemple précédent des agroforêts à damar, les pratiques agroforestières jouent souvent un rôle écologique important, en particulier vis-à-vis de la biodiversité (Schroth *et al.*, 2004). En Amérique centrale, les plantations agroforestières de café (*Coffea arabica*) qui reproduisent la structure des forêts naturelles ont des indices de biodiversité comparables aux forêts protégées et ont une valeur importante en matière de conservation (Perfecto *et al.* 1996, Leakey, 1999). Dans la même région, les cacaocultures sous arbres d'ombrage recouvrent aussi une diversité élevée de plantes cultivées ou spontanées, refuge et habitat de nombreuses espèces végétales et animales, jouant ainsi un rôle déterminant dans le maintien de la biodiversité dans des zones sensibles. De même, à une autre échelle mais selon le même principe, la réintroduction d'arbres dans les paysages d'openfield des zones tempérées ou méditerranéennes induit une augmentation considérable de la biodiversité des espaces cultivés.

Malgré ces propriétés, ces systèmes connaissent malgré tout des difficultés de productivité et de fertilité des sols auxquelles s'ajoute l'accélération du changement économique (fluctuation des cours des produits agricoles) et social (pression démographique croissante entraînant une réduction des terres

disponibles). La rapidité de ces mutations et la pluralité des contraintes rendent difficile l'adaptation des systèmes par ajustement progressif pratiqué par les agriculteurs. Ce ne sont donc pas des panacées mais leur fonctionnement écologique en fait des systèmes proches, au plan de la structure et de la fonction, des écosystèmes forestiers naturels.

Au plan social, la multiplicité des sources de revenu ou de services (bois, pharmacopée, cueillette, chasse, protection climatique, limitation des pertes en nitrate, paysage, protection contre l'incendie, etc.) offertes par les systèmes agroforestiers, constitue souvent un facteur de stabilité important. Cela permet de compenser l'instabilité des cours des produits agricoles (cas des produits tropicaux comme le café ou le coprah) ou la tendance forte à une baisse des aides structurelles (cas des productions tempérées). Dans les pays tempérés, où la croissance des arbres est plus lente, l'agroforesterie correspond souvent à une stratégie d'épargne à long terme dans le bois. Ces 20 dernières années, l'agroforesterie a été progressivement reconnue comme une forme de mise en valeur efficace, à la fois en zone tropicale et en zone tempérée. En zone tropicale, c'est une stratégie de gestion des ressources naturelles permettant de concilier le développement agricole et les impératifs de conservation du sol, de l'eau, du climat local et régional, et, plus récemment, de la biodiversité (Izac et Sanchez, 2001). En zone tempérée, ces avantages restent valables, mais l'agroforesterie est aussi une stratégie de diversification des exploitations agricoles spécialisées, permettant de mieux préserver l'environnement rural, et qui offrira une ressource en bois de qualité actuellement très déficitaire (Dupraz et Capillon, 2005). Les perspectives de développement de systèmes agroforestiers dans les agricultures tempérées et méditerranéennes sont aujourd'hui importantes, notamment en Europe (Eichhorn *et al*, 2005).

Les systèmes agroforestiers présentent de nombreux critères de durabilité écologique. Certaines fonctions comme le maintien des processus d'évolution de la diversité biologique, le maintien des potentialités de stockage de la biomasse, le maintien des potentialités de régulation des grands flux biogéochimiques ont un rôle écologique régulateur global. Ces systèmes restent toutefois encore mal connus sur le plan de leur fonctionnement, et requièrent, en raison de leur complexité, une approche systémique spécifique pour les étudier.

Les systèmes agroforestiers se distinguent ainsi des systèmes de culture spécialisés par 3 aspects essentiels : (i) leur fonctionnement est basé sur des relations interspécifiques (compétition, facilitation); (ii) ils offrent une biodiversité constitutive élevée ; (iii) Ils produisent une multiplicité de produits et de services environnementaux que les cultures pures ne présentent pas. Les systèmes agroforestiers sont porteurs à la fois de valeurs écologiques (environnementales, patrimoniales) et agronomiques (production, fertilité des sols). Ces agrosystèmes connaissent un regain d'intérêt suite aux nouveaux enjeux sur la biodiversité et le développement durable. Bien que la valeur environnementale et écologique de ces systèmes soit bien reconnue, leur intérêt agronomique reste en question. Le manque d'outils de diagnostic et de gestion qui soient à la fois généralisables et facilement adoptés par les différents acteurs (décideurs, conseillers, agriculteurs) est un frein à la valorisation de ces systèmes. Leur complexité floristique ne permet pas une gestion technique "spécialisée" telle que celle appliquée à des monocultures contenant des espèces et variétés qui ont été sélectionnées pour une fonction bien déterminée. Néanmoins, le label très réducteur de "systèmes peu productifs" et à "faible technicité" occulte la grande diversité fonctionnelle⁵¹ qui existe au sein de ces systèmes. **Les systèmes de type agroforestiers qui associent plantes ligneuses et herbacées, pérennes et annuelles, spontanées et cultivées, constituent ainsi un lieu de rencontre possible voire privilégié entre agronomie et écologie.**

⁵¹ On entend par diversité fonctionnelle la gamme de valeurs d'usage de la végétation, valeur d'usage étant l'ensemble de caractéristiques de cette même végétation lui permettant de accomplir une fonction productive ou environnementale.

Les systèmes agroforestiers des zones tropicales humides constituent des agrosystèmes modèles particulièrement adaptés à l'application des concepts de l'écologie pour différentes raisons : diversité biologique planifiée élevée (nombre d'espèces végétales gérées par l'agriculteur dans le système à un instant donné)
forte hétérogénéité structurelle du système
évolution significative de la structure de la végétation sur un pas de temps long
nombreux services écosystémiques
durabilité reposant sur le rôle de la biodiversité.

Dans un contexte global qui met la priorité sur la stabilité et la durabilité des ressources, les systèmes agroforestiers présentent des atouts considérables. Une meilleure connaissance de leur fonctionnement qui permettrait le développement d'une technicité maîtrisée, ainsi que la mise au point d'indicateurs et d'outils permettant leur gestion, constituent donc un enjeu majeur pour la recherche.

II.3. Les concepts de l'écologie sont-ils opératoires pour analyser, évaluer et concevoir des agrosystèmes ?

II.3.1. Production, stabilité, résilience des agrosystèmes

Les concepts de production, efficacité, stabilité et résilience, comme définis par Holling (1973) sont à la base de la caractérisation des écosystèmes naturels par les écologues. Leur utilisation pour évaluer les agrosystèmes a été proposée par Fresco et Kroonenberg (1992) mais reste en réalité encore peu utilisée.

Le concept de production (ou productivité) est un concept familier des agronomes, bien qu'il soit souvent utilisé pour s'intéresser au rendement utile, alors que c'est d'abord la productivité primaire de l'écosystème qui intéresse les écologues. La résilience est une propriété d'intérêt majeur pour les écologues qui s'intéressent aux écosystèmes naturels (Gunderson, 2000). Le concept de résilience, défini par Holling (1973) est ainsi aujourd'hui largement utilisé en écologie, parfois avec des sens différents. **La résilience se définit comme la capacité d'un écosystème à se réorganiser et à restaurer sa structure et son fonctionnement initiaux après une perturbation.** C'est une caractéristique écologique majeure, qui reflète la nature et la complexité des processus homéostatiques dans un écosystème. Westman (1978) précise que la résilience d'un écosystème peut être caractérisée par son élasticité (temps nécessaire à la restauration), son amplitude (degré de modification atteint avant restauration), son hysteresis (plus ou moins grande asymétrie des trajets d'altération et de restauration) et sa malléabilité (capacité de l'écosystème à subir de fréquentes modifications). Plus récemment, Walker *et al.* (2004) proposent d'autres attributs à la résilience d'un écosystème : sa latitude (limite de déformation au delà de laquelle le retour à l'état initial est impossible), sa résistance (plus ou moins grande aptitude du système à changer), sa précarité (proximité de l'état actuel du système d'un « point de non retour »), la panarchie⁵² (dépendance du système par rapport à des aléas et facteurs extérieurs au système). D'autres attributs des écosystèmes ont été définis, comme l'inertie qui est la capacité d'un écosystème à résister à une modification de sa structure et de sa fonction après une perturbation. Certains sont essentiels pour analyser en particulier les évolutions des écosystèmes habités par l'homme, comme l'adaptabilité et la transformabilité⁵³ (Walker *et al.*, 2004). L'adaptabilité est

⁵² de l'anglais panarchy

⁵³ de l'anglais transformability

ainsi définie par la capacité des acteurs d'un système à influencer la résilience. La transformabilité correspond à la capacité à créer un système nouveau lorsque les conditions écologiques, économiques et sociales sont devenues insupportables.

Quel est le sens et la pertinence des attributs que constituent l'inertie, la résilience, l'adaptabilité et la transformabilité, appliqués au système de culture ? Ces attributs permettent-ils de mieux caractériser ce concept et la manière de l'aborder et de l'utiliser ? Comment le niveau de biodiversité influence-t-il sur la résilience et l'inertie ? Nous ne répondrons pas ici in extenso à ces questions difficiles mais tâcherons de les éclairer par quelques exemples.

A titre d'exemple, on peut ainsi considérer que des systèmes de culture sahéliens qui reposent sur la culture exclusive du mil (seule plante adaptée au milieu écologique) sont peu résilients (faible amplitude en relation avec l'absence de choix, grande précarité par exemple par rapport à une baisse de la pluviosité), peu adaptables et peu transformables (pas d'options alternatives). La durée de la jachère nécessaire au maintien des rendements dans les systèmes de culture à base de défriche-brûlis constitue un autre exemple possible d'application : Quelle est l'amplitude possible du système ? Quelle est son élasticité ? On peut ainsi tenter de généraliser l'utilisation de ces attributs aux systèmes de culture. Un système de culture peut être en situation de précarité (proche d'un état de non retour), facile à modifier (peu résistant), très dépendant de l'extérieur (panarchie), adaptable, transformable ou peu transformable. A titre d'exemple, les monocultures intensives peuvent être considérées comme précaires et peu adaptables (dans la mesure par exemple où la maîtrise des parasites repose exclusivement sur l'utilisation d'un pesticide), les systèmes à base de plantes pérennes sont moins adaptables et moins transformables que les systèmes à base d'annuelles, etc...

Pourtant, la validité et l'opérationnalité de certains de ces concepts est aujourd'hui discutée au sein même de la communauté des écologues (O'Neill, 2001). La définition même de la végétation « naturelle » d'un écosystème est l'objet de débats, voire de polémiques en écologie (Sprugel, 1991). En effet, on considère aujourd'hui que la plupart des écosystèmes naturels ne peuvent être considérés à l'équilibre : ils évoluent en permanence en réponse à un environnement changeant (sous l'effet de perturbations plus ou moins fréquentes, ou de l'évolution du climat). Dans ce contexte, le concept même de végétation naturelle n'a plus de sens évident puisque l'on est face à une recombinaison permanente et dynamique de la végétation. Si ce concept de climax est inopérant, il faut considérer que la structure des écosystèmes évolue en réponse aux perturbations naturelles, de plus ou moins grande ampleur ou fréquence (feux, inondations, changements climatiques, etc.). Alors qu'une perturbation fréquente et régulière sera un facteur de stabilité pour la végétation, l'absence de perturbation engendre des modifications de structure de la végétation : aux espèces adaptées à la perturbation succèdent d'autres espèces. La perturbation devient donc un facteur de stabilité pour l'écosystème. L'Homme a depuis les débuts de l'agriculture utilisé le feu comme perturbation de l'écosystème, mimant ainsi la nature. Réduction de la compétition pour la lumière, destruction par la chaleur des graines d'adventices, apports d'éléments minéraux : les avantages sont nombreux pour la culture implantée après brûlis.

Etudiant l'effet de perturbations plus ou moins régulières sur les écosystèmes, l'écologie fournit des modèles permettant de comprendre l'évolution de la composition spécifique de ces écosystèmes. Les successions d'espèces que l'on observe après une perturbation ont fait l'objet de nombreuses études. D'après Walker *et al.* (2004), la dynamique des écosystèmes peut-être décrite et analysée sous la forme d'un cycle, qui peut être décomposé en quatre 4 phases successives : à une phase de croissance (r), puis de conservation (K), succèdent des phases de sénescence (Ω) puis de réorganisation (α). Les phases Ω et α forment une boucle qui conduit à une nouvelle phase r similaire ou différente de la précédente. Chacune de ces phases correspond à des plantes aux caractéristiques différentes. Aux plantes de type $-r$, productives, colonisatrices, adaptées aux milieux ouverts,

succèdent les plantes de type –K, adaptées à des milieux plus compétitifs aux ressources plus rares. Fécondité, précocité, productivité opposent plantes de type r et K. L'application de cette théorie des cycles adaptatifs aux agrosystèmes et plus précisément aux systèmes de culture mériterait une attention particulière et pourrait se révéler féconde pour comprendre et interpréter les dynamiques de certains systèmes de culture. Des hypothèses pourraient ainsi être formulées sur la durée de la phase K dans un système de culture, les déterminants de la phase Ω ou les opportunités offertes durant la phase α pour mieux comprendre la dynamique et la durabilité de ces systèmes de culture. La présence des phases r, K, Ω puis α n'implique cependant pas nécessairement la réalisation d'un cycle : les passages de r à Ω ou même les passages de α à Ω (sens inverse) sont à priori possibles, a fortiori dans des systèmes contrôlés par l'homme, et doivent être analysés. Les systèmes de cultures traditionnels sur brûlis des tropiques humides fournissent ici un exemple éclairant (Wood et Lenné, 1999) : à la destruction de la forêt par le feu succède l'implantation de plantes à graines (riz, maïs, etc.), bientôt suivies de plantes à multiplication végétative (manioc, taros, ignames, bananiers) bientôt associés et/ou remplacés par des espèces pérennes ligneuses (fruitiers, palmiers, cocotiers). A la culture de graines, succède la « végéculture » suivie de l'arboriculture, créant *in fine* un couvert forestier.

Par définition, l'agriculture engendre des perturbations régulières : le labour, le sarclage constituent d'autres exemples. Permettant un retour annuel à un état structural identique (ou du moins similaire), le travail du sol, l'une des pratiques à l'origine de l'agriculture, peut être considéré comme un moyen efficace de préparer la culture suivante. Mais le labour ne crée pas les mêmes conditions de développement d'espèces telluriques que les techniques qui consistent à ne pas perturber le sol par une action mécanique (Neher et Barbercheck, 1999). Les faune et flore du sol (micro, meso et macro-) sont profondément modifiées dans les systèmes travail vs. non travail du sol. La biodiversité tellurique paraît augmentée en cas de non-travail du sol, en relation avec les importantes quantités de résidus et de matière organique restituées au sol dans les systèmes au sol non travaillé. Le travail du sol constitue ainsi une perturbation écologique qui modifie la dynamique et l'équilibre entre de nombreuses espèces animales et végétales (adventices, vers de terre, etc.).

Ces notions paraissent aujourd'hui essentielles pour aborder l'évolution à long terme des systèmes de culture, par exemple les systèmes de défriche brûlis pour lesquels la jachère qui réapparaît de manière cyclique ne permet pas toujours un retour à un état initial, ou les systèmes agroforestiers complexes qui associent plusieurs espèces sur des pas de temps différents et dans lesquels les espèces peuvent avoir des fonctions variées. L'évolution des systèmes de culture concerne l'ensemble des peuplements qui le composent, soit l'ensemble des objets biologiques composant la biocénose (végétaux cultivés et non cultivés, communautés animales, microflore du sol, etc.). Comment les processus de colonisation, compétition, prédation, mutualisme, extinction interviennent-ils dans la succession ? Comment les interventions humaines interviennent à leur tour dans ces processus pour maîtriser cette évolution ? Si, pour les écosystèmes naturels, on peut distinguer des successions autogènes qui correspondent aux successions gouvernées par des processus internes (par exemple lorsqu'une diminution de matière organique dans le sol entraîne un changement de la biocénose) et des successions allogènes (lorsque les successions sont gouvernées par des processus externes), ces distinctions restent pertinentes pour aborder les successions dans les systèmes de culture.

Cette vision, profondément différente du point de vue de l'agronomie classique, a donné lieu à de nouvelles pratiques de culture, aujourd'hui largement répandues aux Etats-Unis, au Canada, en Australie ou encore au Brésil, pratiques qui consistent à maintenir en permanence le sol couvert par un mulch biologique et à ne pas le travailler. Cet ensemble de techniques, appelé parfois agriculture de conservation⁵⁴, a apporté de réelles solutions au problème de l'érosion des sols dans certaines

⁵⁴ en anglais : conservation agriculture, conservation tillage, no tillage ou minimum tillage

conditions. Il permet dans certains cas une meilleure conservation des sols (diminution de l'érosion), modifie (intensifie) l'activité biologique des sols et leur structure et permet ainsi une stabilisation et une augmentation des rendements ainsi que certains services environnementaux (comme l'augmentation de la séquestration du carbone dans les sols, la diminution de l'utilisation d'énergie fossile). Malgré ces avantages apparents, ces techniques restent pour l'instant peu répandues en Europe (Holland, 2004) ainsi que dans la petite agriculture tropicale, et ce pour des raisons à la fois biophysiques et technologiques, organisationnelles et institutionnelles (Erenstein, 2003).

D'une manière générale, il paraît aujourd'hui évident que les agrosystèmes mériteraient d'être réexaminés au regard de l'écologie. Les écologues, plus que les agronomes, se sont en effet intéressés aux fonctions et au rôle des espèces dans les écosystèmes. La coexistence d'espèces en compétition dans un environnement fluctuant ou spatialement structuré, la création d'une hétérogénéité spatiale par les organismes eux-mêmes, ou la permanence de dynamiques loin de l'équilibre sont ainsi étudiées, en particulier dans les écosystèmes forestiers. Le passage d'interactions positives à des interactions négatives entre espèces en fonction de modifications mineures du milieu ou du stade de développement des espèces a été mis en évidence, autant de processus qui restent souvent à étudier dans les écosystèmes cultivés.

II.3.2. Les enjeux et les rôles de la biodiversité dans les écosystèmes

La diversité spécifique est un des traits majeurs des écosystèmes naturels. Le rôle de la diversité biologique dans le fonctionnement des écosystèmes a fait et fait toujours l'objet de nombreux travaux dans la communauté des écologues. Certains travaux récents ont ainsi montré des corrélations positives entre la biodiversité et la productivité primaire, la rétention des nutriments, la résilience après un stress, dans les écosystèmes naturels (Hector *et al.*, 1999 ; Loreau *et al.*, 2001), mais aussi dans les écosystèmes cultivés (Altieri, 1999). Depuis Darwin, l'hypothèse que la stabilité et la durabilité des écosystèmes reposent sur leur diversité biologique a fait l'objet de nombreuses études (et débats) chez les écologues. Plus récemment, Tilman *et al.* (1996) ont ainsi évalué la durabilité de nombreux écosystèmes prairiaux caractérisés par des niveaux de diversité biologique (nombre d'espèces végétales présentes) différents. Dans ce cas, le fait que des indicateurs de durabilité comme le niveau de recyclage des éléments minéraux mais aussi la productivité augmentent avec la diversité biologique confirme l'opinion générale mais ouvre surtout des perspectives intéressantes pour la gestion des prairies. En réalité, l'hypothèse générale qu'une communauté complexe soit plus stable qu'une communauté composée d'un nombre limité d'espèces reste largement à confirmer et cette confirmation semble dépendre d'un grand nombre de facteurs. Vitousek et Hooper (1993) montrent que la relation entre le nombre d'espèces dans un écosystème et les fonctions assurées par cet écosystème (comme la productivité primaire par exemple) est le plus souvent de nature asymptotique : un nombre relativement peu élevé d'espèces est susceptible d'atteindre un niveau élevé d'efficacité pour la fonction considérée.

Depuis ses origines, et avec des intensités variables, l'agriculture a profondément marqué les écosystèmes de la planète. L'agriculture, en orientant le choix et la sélection génétique des espèces cultivées ou élevées, a eu des impacts majeurs sur la diversité biologique. A l'inverse des écosystèmes naturels dont la majorité associent une strate herbacée et une strate arborée, l'immense majorité des systèmes cultivés intensifiés ne comprennent plus qu'une seule strate de végétation, et beaucoup sont monospécifiques. L'agriculture intensive est ainsi souvent accusée d'avoir favorisé une « érosion génétique » des espèces, de reposer sur une base trop étroite d'espèces et de variétés productives rendant ainsi vulnérables les agrosystèmes aux attaques des parasites et ravageurs. Ce processus

peut s'analyser à différentes échelles et sur des pas de temps qui vont de quelques heures à plusieurs millénaires. Différentes solutions sont proposées pour pallier les inconvénients de cette évolution. Par exemple, en établissant des mosaïques de parcelles d'espèces (pérennes) différentes, en mettant en place des mélanges multistrates plurispécifiques, on rétablit partiellement la structure des habitats forestiers naturels. Le sol n'est plus perturbé et reste protégé, canopées et systèmes racinaires fournissent des habitats à de nombreuses espèces sauvages. Ce schéma fait aujourd'hui l'objet de recherches spécifiques⁵⁵.

L'utilisation de la diversité biologique se décline en agriculture par des pratiques très variées principalement basées sur le mélange d'espèces cultivées (cultures associées, successions de cultures, cultures en relais, agroforesterie). Elle peut être mise en œuvre à l'échelle de la parcelle mais aussi à l'échelle du territoire cultivé où peuvent s'exprimer des propriétés spécifiques (liées notamment aux mosaïques paysagères). L'utilisation de la diversité biologique à des fins productives à l'échelle d'un territoire reçoit de plus en plus d'attention i) dans les pays du Sud où ces pratiques constituent une base des agricultures traditionnelles et souvent une des conditions de leur durabilité, ii) en Europe que ce soit dans le cadre de la nouvelle PAC (réduction de la dimension des parcelles, présence d'éléments naturels obligatoires dans la SAU) ou dans le cadre de stratégies intégrées de défense contre les ravageurs basées sur une biodiversité accrue. Aux deux échelles qui nous intéressent (la parcelle et le territoire⁵⁶), dans des conditions de ressources limitées et variables dans le temps et l'espace, l'optimum serait dans les systèmes riches en interfaces (Passioura, 1999). Il s'agit d'une forme de recherche de la pérennité de la couverture végétale dans les systèmes cultivés (Pimm, 1997). Un exemple célèbre de système agricole menacé est celui des plaines céréalières d'Australie de l'ouest, où le remplacement de la couverture végétale naturelle à base de pérennes à enracinement profond par des cultures annuelles à enracinement superficiel conduit actuellement à une crise écologique majeure (salinisation et abandon des terres cultivées sur plusieurs millions d'hectares) (Pannell et Ewing, 2004). Mais des exemples plus proches de nous sont aussi parlants : dégradation des sols viticoles par plusieurs décennies de monoculture et d'usage massif des désherbants ; difficultés de contrôle des ravageurs dans les bananeraies intensives suite aux interdictions récentes de nombreuses molécules actives. A l'inverse, de nombreux systèmes traditionnels tropicaux font face à la nécessité d'accroître leur productivité sans perdre les avantages que leur confère leur diversité d'espèces notamment face aux aléas climatiques ou économiques.

Une nouvelle stratégie, qui repose précisément sur le principe d'imitation des écosystèmes naturels, se base principalement sur l'utilisation d'un niveau élevé de biodiversité, comme c'est souvent le cas dans les écosystèmes naturels. Par exemple, l'écosystème prairial naturel peut apparaître comme un modèle à imiter car il protège le sol de l'érosion, recycle l'azote grâce aux micro-organismes fixateurs, contrôle la pullulation et l'expansion des mauvaises herbes, ravageurs et maladies (Piper, 1999). Le modèle prairial s'oppose ainsi au modèle « intensif » (monospécifique) pour un nombre important de critères comme la robustesse, la résilience, la biodiversité, la perte en nutriments, la dépendance énergétique. Reposant sur un mélange complexe d'espèces herbacées pérennes en C3 et C4, et d'espèces fixatrices d'azote, l'écosystème prairial ainsi décrit dans sa structure et ses fonctions devient un modèle pour la conception d'agroécosystèmes durables (Jackson, 2002).

Mais de la prairie naturelle à la parcelle productrice de grain, fut-elle plurispécifique, quel continuum écologique concevoir pour créer un agrosystème durable...et productif ?

⁵⁵ <http://ecoagriculturepartners.org>

⁵⁶ La parcelle constitue notre domaine d'étude privilégié mais l'organisation des systèmes de culture dans l'espace et leurs interactions constitue un objet d'étude complémentaire pour l'avenir

Quelles sont donc les vertus de la biodiversité pour concevoir des systèmes de culture durables ? Elles sont susceptibles de revêtir différentes formes⁵⁷. La diversité induite par la structure hétérogène d'un peuplement ou un mélange d'espèces cultivées peut par exemple contribuer significativement à la protection des cultures contre les ravageurs. Dans les systèmes de culture, l'enjeu principal peut-être de réduire les risques de pullulation des bio-agresseurs, afin de limiter le recours à des traitements phytosanitaires préjudiciables à l'environnement, ou indisponibles pour des raisons économiques. Il s'agit de renoncer à des pratiques relativement confirmées mais devenues pour partie inappropriées voire dangereuses pour l'écosystème et l'homme dans l'écosystème et de faire adopter une conception de prévention du risque et des pratiques de gestion nouvelles (Ferron et Deguine, 2004). Cette évolution implique souvent de raisonner une action globale, s'appliquant à différents niveaux d'organisation : parcelle, exploitation, terroir. Le problème se pose donc en termes de gestion de populations, dans l'espace et dans le temps, en recherchant des solutions à court et à long terme, ce qui conduit à prendre en considération la gestion des habitats des espaces cultivés ou non (Ferron et Deguine, 2004). Cette gestion écologique de l'espace interfère avec les structures agraires en contribuant à l'aménagement du paysage (Thenail, 2002 ; Papy, 2001). A l'échelle de la parcelle, cela implique une meilleure connaissance de la dynamique des bioagresseurs en relation avec la dynamique des espèces cultivées, non cultivées et l'évolution du milieu.

Ces différents éléments nous amènent à nous interroger sur le(s) rôle(s) de la biodiversité dans le fonctionnement des agroécosystèmes. Quel est le lien entre biodiversité et productivité, stabilité, ou résilience des agroécosystèmes ? Ces questions, nouvellement posées, restent encore souvent sans réponses précises.

II.3.3. Caractériser la biodiversité : les traits et groupes fonctionnels

II.3.3.1. Traits et groupes fonctionnels en écologie

L'analyse du rôle de la diversité biologique dans les performances et la stabilité des systèmes se heurte toutefois à la difficulté de pouvoir prévoir le comportement d'un nombre d'espèces élevé dans un nombre de situations très variées. Une manière de contourner cette difficulté consiste à réduire la diversité d'espèces à une diversité de fonctions et de structures. Par exemple, en écologie forestière, la résilience après ouverture, l'exploitation de sols dégradés, la constitution d'une structure pluristratifiée ou plus généralement la constitution d'un milieu favorable à la vie de certaines espèces, la constitution de réserves minérales, le pompage de l'eau profonde sont étudiés et mis en relation avec la diversité biologique.

Vandermeer *et al* (1998) formulent différentes hypothèses quant au rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes : à partir d'un certain seuil, le nombre d'espèces présentes n'a plus d'effet sur le fonctionnement des écosystèmes, l'ensemble des fonctions étant assurées, permettant ainsi un fonctionnement stable du système.

57 Voir sur ce sujet l'article de synthèse en cours de publication (A13 Malézieux, E., et al., Mixing plant species in cropping systems; concepts, tools and models. A review. Agronomy for sustainable development, 2008).

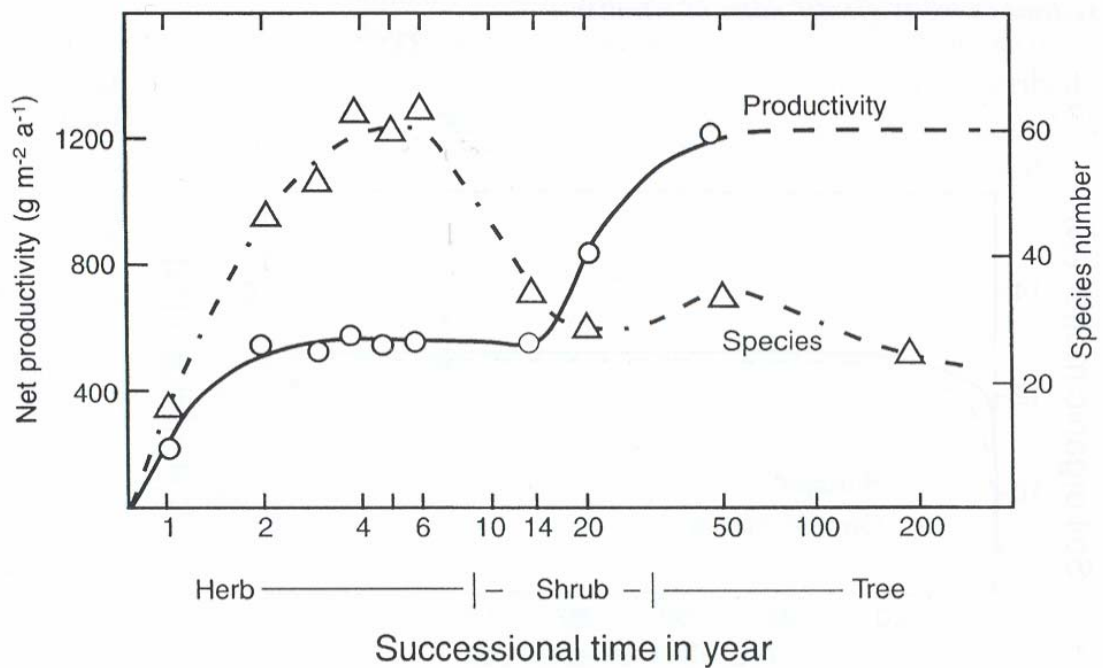


Figure 1 : Relationship between community productivity and species numbers in a successional series for an oak-pine forest in New York (from Mooney & Gulmon (1983) after Whittaker (1975) and Woodwell (1974))

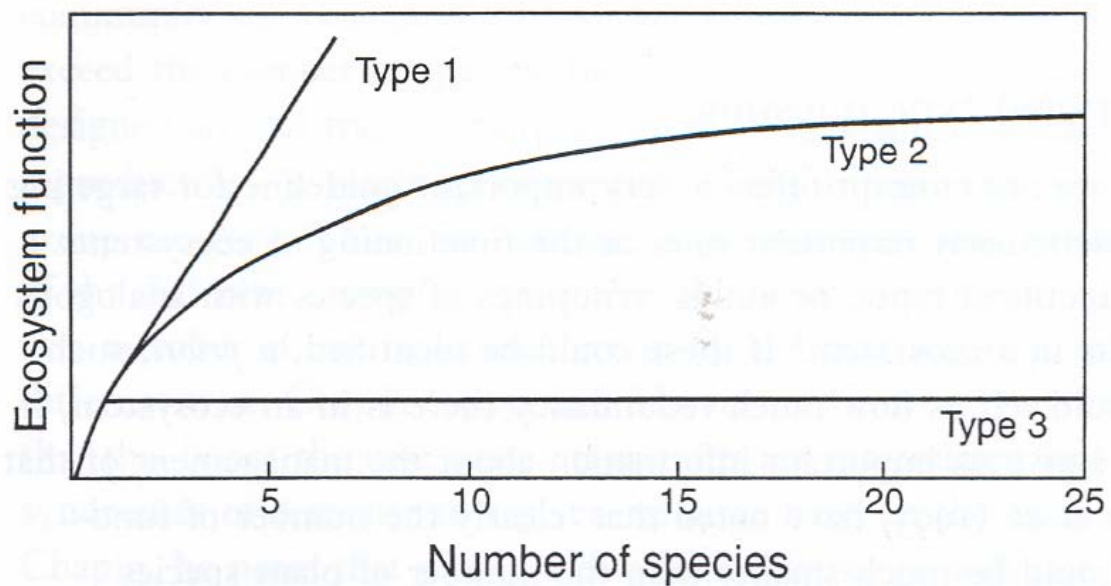


Figure 2 : Theoretical relationship between species function and species numbers (from Vitousek & Hooper 1993)

La figure 1 est une illustration de cette absence de relation directe entre la productivité d'un écosystème et le nombre d'espèces qui le constitue : à partir d'un certain stade dans la succession, la productivité de l'écosystème augmente alors que le nombre d'espèces diminue. La « redondance » (espèces assurant les mêmes fonctions), peu utile en cas de stabilité environnementale, devient cependant efficace lors d'une perturbation du système, les espèces réagissant différemment à cette perturbation. De nombreuses études en écologie montrent que la composition de l'écosystème en différentes espèces paraît plus importante que le nombre d'espèces per se. (Loreau *et al.*, 2001) Il y a ainsi un intérêt croissant en écologie à considérer les différentes espèces d'un écosystème sous l'angle de leur « fonction » dans cet écosystème, à la fois vis-à-vis des questions concernant l'évolution de cette végétation, et les relations entre cette évolution et les changements environnementaux. Cet intérêt s'est traduit par la définition de **traits fonctionnels**⁵⁸ à même de traduire cette classification fonctionnelle des espèces. Dans un écosystème donné, des traits fonctionnels sont ainsi définis pour chaque espèce ou groupe d'espèces dans la perspective générale de relier la composition de l'écosystème à son fonctionnement (Shugart, 1997). Cette démarche à même fait l'objet d'un effort de standardisation dans la communauté scientifique des écologues au niveau international (Cornelissen *et al.*, 2003). Il s'agit ici de comprendre les réponses de la végétation à des variations de l'environnement (climat, usage des terres, régimes divers de perturbation, etc.) ou, à l'inverse de prévoir l'impact de la végétation sur ces différents paramètres (Lavorel et Garnier, 2002).

Un des objectifs consiste à vérifier que les espèces qui présentent une certaine homogénéité, du point de vue de ces traits, sont « interchangeables » (quel est le degré de redondance présent dans les écosystèmes ?), de qualifier et quantifier le comportement de ces espèces (recherche de seuils d'irréversibilité). La définition de **groupes fonctionnels** (Gitay et Noble, 1997) correspond à cet objectif : il s'agit de regrouper les espèces qui utilisent les mêmes ressources (guildes), et celles qui répondent de manière similaire à une perturbation donnée (types). Ces groupes sont-ils nombreux (nouvelle approche de la diversité), sont-ce les mêmes et jusqu'à quel point en fonction des questions posées ? Quel est leur degré de fragilité ? Peut-on les utiliser de manière opérationnelle (allant de la reconstitution de terrains dégradés à la modélisation des grands flux à l'échelle de la biosphère), à quelles échelles ? Il s'agit aussi de vérifier la nature des liens existant entre diversité spécifique, fonctionnelle et intra-spécifique. Vitousek et Hopper (1993) ont établi les diverses relations possibles entre la fonction d'un écosystème (comme sa productivité) et le nombre d'espèces qui constituent cet écosystème (figure 2). Si la courbe de type 2 semble la plus probable dans de nombreuses situations, ceci reste à confirmer. Dans certains cas, la très grande diversité spécifique des écosystèmes constitue un obstacle à la compréhension du fonctionnement de cet écosystème et à sa modélisation. Le regroupement des espèces en des groupes fonctionnels constitue alors une démarche possible pour permettre la modélisation de l'écosystème et prédire ainsi son évolution. C'est en particulier la démarche adoptée pour comprendre et simuler le fonctionnement des forêts tropicales humides caractérisées par un nombre élevé d'espèces (Gourlet-Fleury *et al.*, 2005).

II.3.3.2. Convergences des modèles « prairiaux » et « forestiers »

Les agroécosystèmes prairiaux et pastoraux constituent des agroécosystèmes ou les pratiques techniques sont à la fois des sources de perturbation des dynamiques écologiques et des facteurs écologiques capables de « piloter » ces dynamiques à des fins de production agricole et de fonctions environnementales. Il s'agit par exemple de contribuer à l'évolution des pratiques d'élevage en vue d'une gestion durable des ressources végétales, raisonnée en fonction des dynamiques écologiques végétales et participant à la conservation des milieux naturels. Les problématiques posées par ces

⁵⁸ *plant trait* en anglais

systèmes sont très proches de celles posées par les systèmes agroforestiers que nous nous proposons d'étudier et la recherche de points communs et similitudes d'approche et d'outils pourrait être une piste féconde. Dans ces systèmes comme dans ceux que nous nous proposons d'étudier, il est nécessaire de recourir aux outils de l'écologie fonctionnelle mais avec des objectifs agronomiques, comme par exemple l'étude de la dynamique démographique de ces peuplements en relation avec la production pluriannuelle et à long terme. Les peuplements herbacés constituent un des modèles privilégiés puisqu'ils ont fait et font toujours l'objet de nombreuses études théoriques notamment sur les relations entre démographie, pérennité et stabilité (Grime, 1973 ; Tilman, 1999; Loreau et Hector, 2001). Ces couverts herbacés sont étudiés par l'approche des « traits fonctionnels » qui part de l'hypothèse que des groupes d'espèces ayant des fonctions similaires partagent des caractéristiques biologiques communes (Cornelissen *et al.*, 2003). Cette approche a par exemple été validée pour étudier des gradients de fertilité et des compétitions trophiques dans le cas des successions de friches post-culturelles (Garnier *et al.*, 2001, 2004) mais aussi sur des couverts prairiaux pilotés en conditions agronomiques (Al Haj Khaled, 2005). Dans ces systèmes, l'évaluation de la diversité biologique et de la valeur d'usage d'un système a été abordée de différentes manières (Cruz *et al.*, 2002). La plus répandue est la description plus ou moins exhaustive de la composition botanique des parcelles. Cette méthode nécessite beaucoup de temps et des connaissances poussées en botanique et se heurte à une description relativement limitée des caractéristiques agronomiques de la végétation (Cruz *et al.*, 2002). Seuls les experts, connaissant les propriétés agronomiques des espèces, peuvent attribuer une valeur d'usage globale au système. Les mêmes pratiques et les mêmes obstacles sont observés pour les systèmes agroforestiers. L'approche *via* des regroupements d'espèces sur la base de types fonctionnels de plantes, caractérisés par une ou plusieurs valeurs communes de traits fonctionnels, a permis de réaliser une lecture simplifiée de végétations complexes. Ces traits peuvent être définis comme des caractéristiques biologiques des espèces (morphologiques, physiologiques, phénologiques, démographiques, etc.) traduisant des fonctionnements ou des stratégies. Les types ou groupes fonctionnels peuvent être déclinés en groupes de réponse et groupes d'effet (Lavorel et Garnier, 2002). Dans le premier cas, ils rassemblent des espèces présentant une même réponse aux variations des facteurs du milieu ou des pratiques. Les traits qui permettent de les définir, appelés **traits de réponse**, peuvent être utilisés comme indicateurs sur les gradients des facteurs étudiés, illustrant la préférence des espèces et types fonctionnels à des conditions plus ou moins fertiles ou leur tolérance à des défoliations plus ou moins fréquentes par exemple. Dans le second cas, les espèces d'un même groupe d'effet présentent un rôle ou une fonction similaire dans l'écosystème et par conséquent des valeurs de **traits d'effet** similaires. Ces traits ont permis d'établir une typologie d'espèces dans laquelle chaque type présente des caractéristiques lui conférant une valeur d'usage particulière (Ansquer *et al.*, 2004). Cette typologie divise les espèces en différents types fonctionnels qui correspondent à leur préférence pour des milieux plus ou moins fertiles et à leur adaptation à des intensités d'utilisation plus ou moins fortes. Ces groupes sont aussi corrélés à des caractéristiques agronomiques de la végétation. Dans les systèmes agroforestiers, d'autres traits doivent être identifiés. Dans l'unité, la réponse de peuplements herbacés aux contraintes hydriques est étudiée par l'équipe Enherbement pérenne de l'UMR en collaboration avec le CEFÉ (équipe d'E. Garnier, CNRS, Montpellier). L'objectif est de déterminer les paramètres déterminants de l'évolution démographique et de la production pluriannuelle d'un enherbement complexe en privilégiant l'analyse du fonctionnement et des dynamiques pendant les périodes sèches qui conditionnent les compétitions entre plantes au sein du peuplement herbacé.

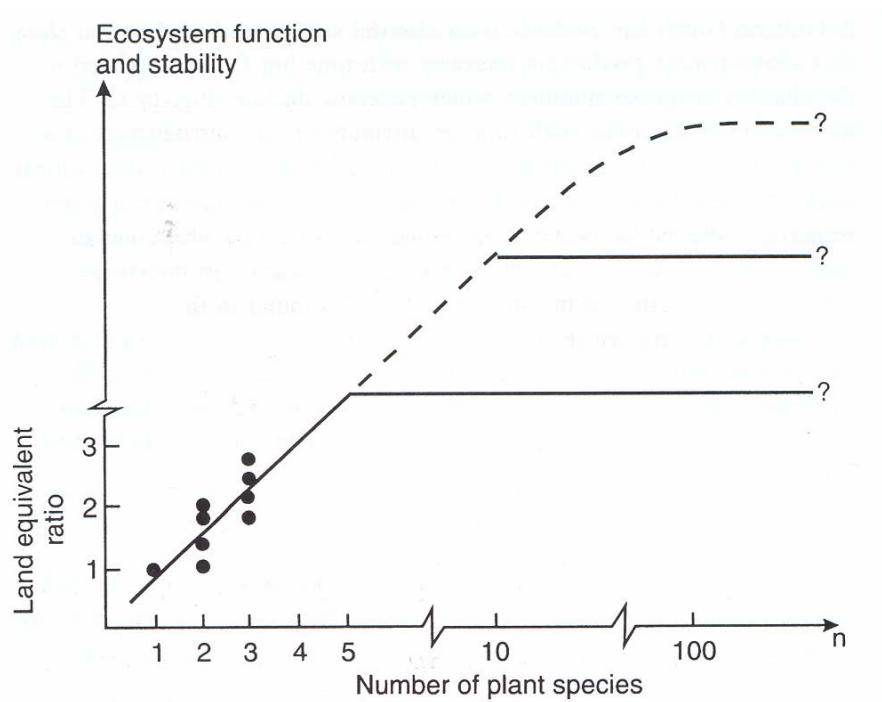


Figure 3 : Productivity of monoculture and mixed cropping in cassava. Swift & Anderson (1993) propose that productivity increases may not continue after three species; however, there may be an increase in other functions of the systems owing to greater nutrient retention.

II.3.3.3. Traits et groupes fonctionnels en agronomie

Le **concept de trait fonctionnel**, de même que la méthodologie qui consiste à relier les traits spécifiques à des groupes fonctionnels ont été peu ou pas utilisés par les agronomes pour aborder le fonctionnement des agrosystèmes. Les traits, qui, d'une manière générale visent à représenter les réponses et les effets de la végétation à différentes échelles (de la placette jusqu'à des biomes et des continents pour certains d'entre eux) constituent-ils des outils pertinents voire efficaces à l'échelle des systèmes de culture ? L'un des obstacles à la définition des traits fonctionnels admis par tous est la diversité des questions posées et des échelles abordées au sein de la communauté des écologues. Pourtant la convergence des questionnements entre écologues et agronomes doit ici être soulignée : prévoir les effets des plantes sur l'écosystème -y compris en analysant l'effet de la diversité des types fonctionnels sur le fonctionnement et la résilience du système- devient une préoccupation commune. On peut donc faire l'hypothèse d'une utilisation possible du concept de trait fonctionnel en agronomie. En effet, la productivité d'un agrosystème peut augmenter avec le nombre d'espèces cultivées mais le nombre optimal d'espèces pour cette fonction reste une variable difficile à déterminer (figure 3). Ewel proposait déjà en 1986 de concevoir de nouveaux systèmes de culture multispécifiques sur la base des groupes fonctionnels (Ewel, 1986).

L'un de nos objectifs est d'aborder et de tester la pertinence des **concepts de trait et groupe fonctionnels** dans le cas de nos systèmes plurispécifiques cultivés. Nous nous proposons d'adapter aux écosystèmes cultivés ces outils et méthodes utilisés par les écologues sur les écosystèmes naturels. Dans le cas des **systèmes agroforestiers complexes** (nombre élevé d'espèces utiles) sur lequel nous nous concentrons, la caractérisation du système à un instant donné (structure de la végétation aérienne et souterraine) permet en partie d'expliquer la productivité instantanée des différentes composantes du système. Son évolution doit cependant se raisonner sur le long terme : la dynamique des végétaux ligneux cultivés opère sur plusieurs dizaines d'années. La diversité fonctionnelle, qui peut être liée à des variations de la flore (différentes espèces) ou de la structure (strates du couvert), se traduit dans tous les cas par une souplesse d'adaptation de l'ensemble des ressources vis-à-vis des aléas climatiques et de changements au cours du temps dans les systèmes de production. Dans notre cas comme dans celui des systèmes prairiaux, cette approche originaire de travaux en écologie est appliquée à une problématique agronomique dans l'optique de construction d'outils de diagnostic et de gestion des systèmes. Pour cela, les traits utilisés doivent remplir des conditions particulières qui portent sur leur facilité de mesure, leur corrélation à des fonctions précises de la plante et aux caractéristiques agronomiques définissant la valeur d'usage. Un trait qui satisfait à ces exigences pourrait alors être considéré comme un bon marqueur biologique du fonctionnement des espèces vis-à-vis d'attendus agronomiques.

Différentes actions ont été engagées sur ce thème. Un projet d'Action Thématique Programmée (ATP) a été proposé par l'Unité et retenu pour financement par la Direction Scientifique du Cirad. L'objectif du projet (en cours) est de mettre au point des méthodes de mesure et des indicateurs des performances agroécologiques des systèmes de culture complexes multistrates en zone tropicale humide. Ces indicateurs seront élaborés à l'échelle de la parcelle, privilégiant une approche focalisée sur le fonctionnement biophysique des systèmes. Les cas étudiés portent sur des systèmes à base de cacaoyer (Cameroun) et cocotier (Vanuatu) en association avec les plantes à racines et tubercules, plantain et bananiers, espèces présentes sur les 2 sites. Ce projet contribue à structurer nos actions dans ce domaine et permettra de conforter cette thématique sur les sites du Cameroun et du Vanuatu, en partenariat avec d'autres unités du Cirad et de l'INRA. Des résultats préliminaires ont d'ores et déjà été obtenus et présentés à des congrès (C60, C64, C65, C66).

II.4. Faut-il revisiter le concept de système de culture ?

Le système de culture, dont l'expression est déjà présente au XVIII^{ème} siècle (Sébillotte, 1996), joue un rôle clé pour les agronomes. Redéfini par Sébillotte dans les années 70 (Sébillotte, 1974), il a constitué un concept central pour établir les bases théoriques de l'agronomie d'aujourd'hui. Défini comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique » (Sébillotte 1990) le système de culture met en avant l'acte technique. Il s'accompagne par ailleurs de la définition de « l'itinéraire technique » qui permet de préciser la succession des actes techniques au cours d'un cycle cultural. Ces définitions permettent une prise en compte approfondie de la dimension temporelle qui s'exprime surtout à un pas de temps court pour raisonner les choix tactiques au moment de réaliser les opérations culturales et analyser les interactions entre deux cultures successives. Les concepts liés d'effet précédent (variation des états du milieu entre le début et la fin d'un cycle cultural) et de sensibilité du suivant (réponse d'une culture aux états du milieu en particulier du sol laissés par la culture précédente) sont particulièrement féconds pour raisonner l'articulation entre deux cultures successives. Que ce soit dans une perspective d'évaluation, de conception, ou de pilotage, le concept de système de culture offre ainsi une représentation opérationnelle du mode d'intervention de l'agriculteur et dans une moindre mesure du système biophysique modifié par lui. Cette dimension organisationnelle, qui s'articule à plusieurs niveaux (l'itinéraire technique est « une suite logique et ordonnée » d'actes techniques), a été largement valorisée par les agronomes qui s'intéressent au fait technique et s'exprime jusque dans des travaux dans le domaine des sciences cognitives. Pourtant, le système de culture comprend d'autres dimensions que les dimensions organisationnelles. Le sens biologique (à travers la nature des cultures et leur succession) est également explicite, conférant une certaine dualité au concept : On retrouve bien cette dualité dans cette définition formulée par Sébillotte (1990) :

« Chaque système de culture se définit par :

- la nature des cultures et leur ordre de succession,
- les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut les choix des variétés pour les cultures retenues. »

Ce concept s'est révélé particulièrement fécond durant la période récente (depuis les années 70) pour accompagner l'objectif d'intensification de l'agriculture et en particulier l'augmentation des rendements. Il s'agissait alors d'optimiser l'itinéraire technique des différentes cultures successives dans la perspective d'augmenter la productivité de la terre ou celle du travail. Cette démarche a été appliquée avec succès, y compris pour un certain nombre de cultures tropicales, conduites selon un mode agro-industriel : plantations de banane et d'ananas, de palmier à huile et d'hévéa. Cependant, dès les années 80 et 90, alors que les préoccupations environnementales apparaissent, le concept de système de culture est utilisé pour concevoir des itinéraires techniques utilisant moins d'intrants (Debaeke et Nolot, 2003) et pour raisonner un processus de désintensification visant à limiter l'emploi de pesticides et d'engrais de synthèse (Meynard et Savini, 2003). L'évolution vers de nouveaux systèmes de culture sans ou avec moins d'intrants de synthèse implique pour l'agriculteur un remplacement de l'intrant chimique par une connaissance nouvelle, basée sur la compréhension des ravageurs, adventices, maladies et vecteurs dans les systèmes de culture. Bien plus que dans un agrosystème intensif à haut niveau d'intrants, les décisions prises sur une culture ont des conséquences déterminantes sur les cultures associées ou les cultures suivantes. En effet, la maîtrise des populations de ravageurs dépend alors, non pas de l'application d'une technique ponctuelle, mais d'une connaissance et d'une gestion globale des populations et de leur évolution sur plusieurs cycles de culture. On passe bien d'une connaissance « sectorielle » à une connaissance « holistique » permettant une gestion globale du

système (Kropff, 1996). Le concept de système de culture tel que défini ci-dessus permet à priori d'appréhender ces nouveaux questionnements. Mais permet-il de considérer l'ensemble des dimensions écologiques qui s'imposent ?

Aujourd'hui, l'évolution des connaissances, des objectifs et des techniques dans le domaine agronomique, la nécessité de considérer le fonctionnement écologique du champ cultivé, et parfois de l'intégrer dans un ensemble plus vaste, à un niveau d'organisation territorial plus englobant, nous amènent à revisiter ce concept dans une nouvelle perspective opératoire. D'une manière générale, il s'agit d'abord de tenir compte des relations nouvelles entre agricultures et sociétés, entre nature et sociétés : Ces nouvelles relations exigent de considérer l'agriculture comme un ensemble de processus écologiques en interaction. Cette nouvelle vision, émergente depuis plusieurs années, nous amène à changer de regard sur les objets de la recherche agronomique : la culture devient une population de plantes en interaction, maladies et ravageurs deviennent des populations d'organismes avec lesquels les plantes interagissent, auxquels il faut associer les ennemis de ces plantes et ravageurs, ainsi que l'ensemble des organismes aériens et souterrains qui interviennent dans la fixation de l'azote, la décomposition de la matière organique, etc. L'agronomie, science de l'agriculture, devient ingénierie écologique, l'agriculture, vecteur de production, devient gestion d'écosystème, et l'exploitation agricole, industrie optimisée, devient partie d'un écosystème géré (Weiner, 2003). Le champ cultivé devient objet d'interaction, et habitat, il est inclus dans un espace englobant, le paysage. Ces évolutions nous amènent à nous interroger sur le concept de système de culture, c'est à dire à considérer le système de culture non plus seulement comme une succession de cultures régies par les actes techniques des agriculteurs mais aussi comme un élément d'un écosystème complexe en évolution, soumis à des perturbations, dont le fonctionnement va dépendre de processus internes comme le cycle des éléments ou la régulation de populations de ravageurs ou de pathogènes par leurs ennemis naturels. Ce nouveau paradigme nous oblige à considérer différemment les interrelations entre les différents compartiments du système : plantes cultivées, sol, populations de ravageurs et auxiliaires, etc. Paradoxalement, c'est au moment où l'agriculture offre l'image de certains systèmes les plus polluants, avec des entrées et sorties maximisées, que le parallèle avec le fonctionnement des écosystèmes naturels s'impose, non pour constituer un but en soi, mais bien pour représenter un modèle conceptuel pertinent et opératoire. Cette convergence dans la définition du système étudié suggère d'abolir les frontières méthodologiques entre écosystèmes naturels et cultivés, pour promouvoir des méthodes, concepts et outils adaptés à une compréhension globale du fonctionnement de l'écosystème considéré.

Dans ce contexte, le concept de système de culture est-il toujours adapté ? Est-il utilisable pour décrire et représenter l'ensemble des modes de culture observés hier, aujourd'hui ou observables demain en agriculture ? Il constitue assurément un concept opératoire pour aborder les successions de cultures annuelles (rotations) pour lesquelles il constitue le niveau d'analyse privilégié pour de nombreux travaux de recherche, en particulier en zone tempérée. Il permet même d'appréhender certaines composantes agroécologiques des agrosystèmes. Par exemple la pratique de la jachère a été raisonnée dans le cadre du concept de système de culture (Sébillotte, 1977), à un moment où cette pratique était en voie de disparition dans les agricultures européennes. Son usage en zone tropicale se fit donc sans obstacle majeur par les agronomes dans la mesure où l'on considérait le système de culture comme une succession de cultures annuelles, succession rythmée le cas échéant par la pratique de la jachère. Son usage dans le cadre de systèmes conçus à partir de plantes pérennes fait l'objet de travaux plus récents, mais souvent dans le cadre de monocultures (palmier à huile, hévéa). Dans ce cas le concept d'itinéraire technique permet une analyse agrotechnique de ces systèmes pérennes. Mais l'utilisation du concept de système de culture pour rendre compte de certains systèmes soulève toutefois un certain nombre de problèmes méthodologiques dans certaines situations culturelles particulières mais très répandues, bien que peu d'études n'aient été publiées sur le sujet.

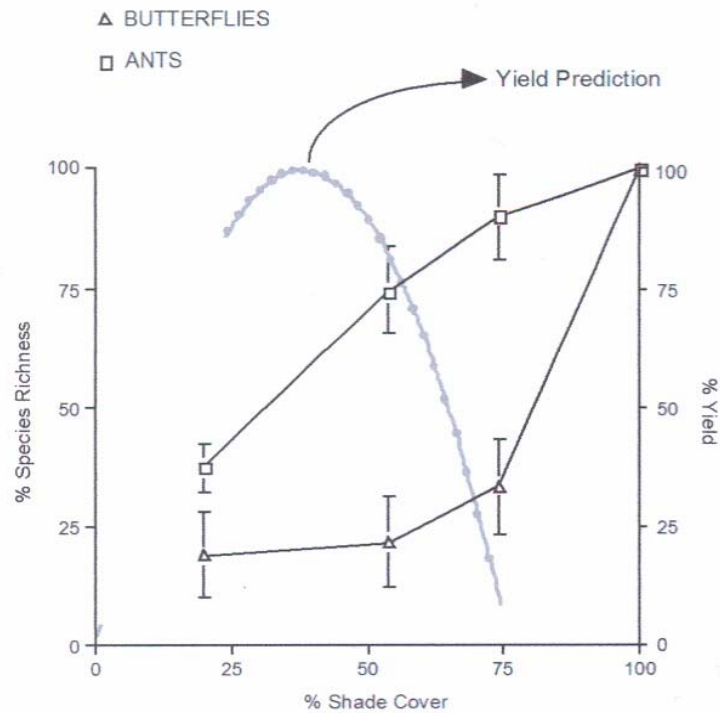


Figure 4 : Relationship between percent species richness of ants and butterflies and the percent of shade cover for 4 management systems (including forest) in the municipality of Tapachula, Chiapas, Mexico (data from [Perfecto et al., 2003](#)). The superimposed curve represents the relationship between percent yield and percent shade cover. The percent of species is based on the total number of species found in the forest habitat. The percent yield is based on the maximum yield attained within a range of shade cover in another study conducted in southeastern Chiapas ([Soto-Pinto et al., 2000](#)).

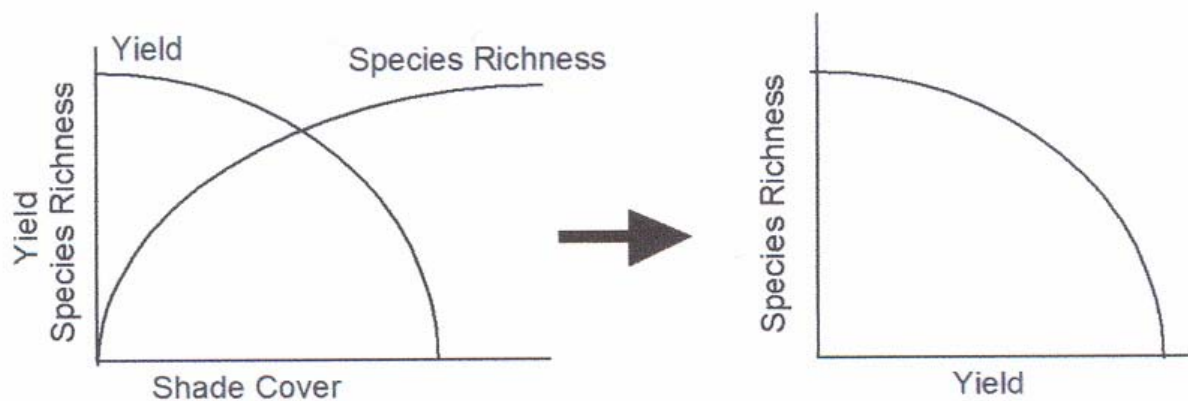


Fig. 5. Construction of the yield set from functions of cover.

C'est en particulier le cas pour les systèmes agroforestiers multispécifiques et multistrates caractéristiques des zones tropicales humides, basés sur une forte diversité biologique. La place centrale de l'agrobiodiversité dans la durabilité des systèmes de culture tropicaux constitue ainsi un point de réflexion particulier. Comment tenir compte de la présence d'arbres (présence spontanée, subspontanée ou dirigée ; culture principale, ou secondaire) dans les systèmes de culture ? comment intégrer l'hétérogénéité associée à la complexité observée dans les systèmes multispécifiques, base des systèmes paysans des tropiques humides (systèmes agroforestiers, jardins créoles) ?, comment prendre en compte les pas de temps différenciés des mélanges d'espèces ? comment considérer les pas de temps longs imposés par les espèces ligneuses⁵⁹ ? Comment décrire les systèmes complexes associant espèces spontanées de la forêt ou de la savane, espèces plantées, semées, entretenues, utilisées ? Du point de vue de la biodiversité il est important de distinguer au sein des systèmes de culture la biodiversité planifiée par l'agriculteur (plantes semées, plantées, entretenues) de la biodiversité non planifiée, ou associée (végétation naturelle ou subspontanée, aux impacts positifs ou négatifs sur la productivité des espèces planifiées). La biodiversité planifiée comprend bien sûr les espèces plantées par l'agriculteur mais peut aussi comprendre un certain nombre d'objets biologiques présents « spontanément » (arbres, buissons, etc.) qui influent sur le fonctionnement du système et contribuent aux services écologiques. L'agriculteur peut par ailleurs exercer un contrôle plus ou moins volontaire sur la biodiversité non planifiée. Les systèmes agroforestiers des tropiques humides offrent une palette de situations où le nombre d'espèces cultivées varie souvent de manière inversement proportionnelle au niveau d'intensification. Ces différents systèmes offrent-ils des avantages différents en matière de « refuge » pour la biodiversité spontanée ? La figure 4 montre que si les systèmes à fort ombrage des systèmes caféiers sous couvert forestier peuvent offrir des conditions favorables aux papillons et fourmis, espèces indicatrices de la biodiversité, ils ont une productivité inférieure (en café) aux systèmes en plein soleil plus intensifs. Peut-on alors établir une corrélation négative entre productivité et richesse en diversité biologique comme le suggère la figure 5 ?

⁵⁹ par exemple, le cycle biologique du cocotier est d'une centaine d'années, il s'inscrit donc sur plusieurs générations d'agriculteurs

Projet thèse P. Jagoret

Fonctionnement et dynamiques des systèmes de culture plurispécifiques à base de cacaoyer dans un bassin de production ancien : le cas du Centre-Cameroun.

A. Problématique et questions de recherche

La cacaoculture est pratiquée au Cameroun depuis le début du XX^{ème} siècle et joue aujourd'hui un rôle essentiel dans le revenu des populations rurales. Pourtant, la structuration par âge du verger de cacaoyers confirme son vieillissement : plus de 40 % du verger présent aujourd'hui a été planté avant 1950. D'autre part, la conduite du verger est principalement extensive, caractérisée par un travail d'entretien des plantations minimum, des désherbages réduits, un faible recours aux produits phytosanitaires, autant de facteurs entraînant de faibles rendements, et une baisse des revenus des producteurs de cacao pouvant entraîner une remise en cause de la pérennité des exploitations à base de cacaoyer. Cependant, présenter le vieillissement et la baisse de productivité du cacaoyer, plante-pivot des systèmes de cacaoculture plurispécifiques anciens du Centre-Cameroun, comme conséquence de l'absence de dynamique de régénération et de la faible intensification des pratiques culturales, doit être nuancé. En effet, une majorité de planteurs renouvellent progressivement leur verger en remplaçant chaque année les pieds morts et en re-densifiant les espaces manquants, ou en recépant ponctuellement les cacaoyers malades ou devenus improductifs. Des cacaoyers d'âges différents sont présents dans chaque plantation et l'âge moyen des cacaoyers est par conséquent souvent inférieur à l'âge de la plantation, témoin d'un système durable. Au plan agronomique, le système de cacaoculture se transforme souvent au cours du temps en un système pluri-espèces où la place du cacaoyer se maintient ou se réduit. Après une phase de production d'une durée variable, au cours de laquelle le cacaoyer est la culture de base du système, trois voies d'évolution sont alors possibles : (i) le système de cacaoculture se diversifie fortement mais devient extensif, réduisant d'autant le rôle du cacao dont les rendements diminuent ; (ii) le système est faiblement diversifié et semi-intensif avec une spécialisation sur la cacaoculture plus forte que dans le système précédent ; (iii) le système reste spécialisé et intensif et le cacaoyer demeure la culture majeure d'un système où les autres espèces occupent une place mineure. Ces trois trajectoires, qui relient fortement le degré de diversification du système de cacaoculture et le niveau d'intensification de l'itinéraire technique appliqué au cacaoyer, constituent une première hypothèse de travail et restent à confirmer.

L'objet de la thèse est d'analyser le fonctionnement et les trajectoires d'évolution sur le long terme de systèmes agroforestiers complexes à base de cacaoyers, et leurs interrelations avec le fonctionnement des systèmes d'exploitation (choix tactiques, choix stratégiques). Les recherches interviendront donc à deux niveaux d'investigation : i) celui de la parcelle culturale d'association d'espèces pérennes et ii) celui de l'exploitation agricole.

Terrain : bassin de production de cacao ancien du Centre-Cameroun (trois zones d'études aux caractéristiques distinctes ont été identifiées en fonction de la densité de population (synonyme de pression foncière) et de l'âge moyen des vergers). Présence de chronoséquences.

Organisme d'accueil : Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), Yaoundé, Cameroun.

Démarrage de la thèse : juin 2007

Unité de rattachement : UPR 34 Cirad-PERSYST

Encadrement : Eric Malézieux (CIRAD-PERSYST/UMR System), Isabelle Michel (CNEARC) Jacques WERY (SUPAGRO)

Ecole doctorale : SIBAGHE (inscription SUPAgro).

Pour considérer ces différents questionnements, le concept de système de culture doit aujourd'hui intégrer des notions issues de l'écologie comme la structure de la végétation et la succession végétale, notions qui permettent d'aborder l'organisation spatiale des objets biologiques et son évolution au cours du temps. Le rôle émergent et déterminant de la biodiversité dans le fonctionnement écologique des agrosystèmes conduit donc à **revoir le système de culture non plus seulement comme un ensemble de pratiques mais bien comme un ensemble d'objets biologiques (plantes cultivées, plantes non cultivées, bioagresseurs et auxiliaires, microorganismes) en interaction sur un espace défini (la parcelle cultivée) sur des pas de temps variables (mais incluant le temps long⁶⁰)**. Cette définition s'adresse ainsi explicitement à l'objet biologique plus qu'à l'objet technique et propose ainsi une réinterprétation du concept plus qu'une réelle évolution⁶¹. Elle revient à considérer le champ cultivé comme un écosystème, lieu de flux d'énergie et de cycle de matière, mais aussi espace d'une biocénose⁶². Cette biocénose est composée d'une part d'une *biodiversité planifiée*, ensemble des plantes gérées par l'agriculteur, dont on peut construire le parallèle avec *la nature et la succession des cultures* issue de la définition de Sébillotte (1990) et d'autre part d'une *biodiversité associée*, pour reprendre la distinction proposée par Swift *et al.* (1996) pour qualifier la biodiversité dans les agroécosystèmes.

Concrètement, les recherches de l'équipe PERSAFT que je dirige, sur les systèmes agroforestiers au Cameroun dans le cadre de la thèse de Patrick Jagoret (cf. encadré), au Costa Rica dans le cadre de la thèse d'Olivier Deheuvels et en Guinée Forestière dans le cadre du projet FSP conduit par Nathalie Lamanda, s'inscrivent dans cette perspective. Un certain nombre de résultats ont d'ores et déjà été présentés (C62, C63, C67, C68).

Cette définition permet d'aborder explicitement non plus seulement la fonction de production de matière (production primaire) comme sortie du système mais aussi les services liés : recyclage ou fuite des nutriments, dynamique de la matière organique, contrôle du microclimat local, régulation des processus hydrologiques, émissions de gaz à effet de serre, détoxifications, etc., et plus particulièrement le lien entre la biodiversité planifiée et la manière dont l'agrosystème remplit ces différentes fonctions. L'analyse des flux d'énergie et du cycle des nutriments dans les systèmes de culture a toujours fait l'objet d'une attention particulière de la part des agronomes, si l'on considère les branches de l'agronomie ou les disciplines connexes qui lui sont dédiées (science du sol, bioclimatologie, écophysiologie). La prise en compte des biocénoses et de leur fonctionnement est beaucoup plus embryonnaire et pose de nombreuses questions. L'analyse des relations entre biodiversité et fonction dans les agrosystèmes reste ainsi complexe et demande des études prenant en compte les différents groupes fonctionnels, ainsi que la teneur et l'intensité des perturbations (Swift *et al.*, 2004).

II.5. De nouveaux outils de modélisation

Les évolutions et changements de paradigmes proposés ici posent inévitablement la question des outils disponibles. La encore, les disciplines de l'agronomie et de l'écologie ont développé séparément les outils et les modèles adaptés à la réponse à leurs propres questions et à leurs objectifs propres. Les

⁶⁰ Le pas de temps long est une notion relative mais on peut le définir comme une durée supérieure à 10 ans, permettant d'appréhender le cycle phénologique d'espèces ligneuses présentes dans le système.

⁶¹ le concept proposé par Sébillotte comprenait dans sa définition la dualité entre dimension biologique et technique même si la dimension « acte technique » comme élément de base du système de culture a souvent été privilégiée dans les études se référant au concept de système de culture.

⁶² La biocénose est définie par l'ensemble des populations qui occupent un milieu

modèles communs aux deux disciplines sont rares. Dans ce contexte, et dans le cas de systèmes de culture complexes, dynamiques, mettant en jeu des cultures pérennes dont le cycle dépasse plusieurs dizaines d'années, l'expérimentation ne permet pas d'acquérir des réponses rapides adaptées à la diversité des situations. La modélisation apparaît dans ces conditions comme un outil de recherche pertinent et performant pour l'aide à la mise au point et à l'évaluation de nouveaux systèmes de culture.

En agronomie et en écologie, il existe des modèles empiriques sur le bilan hydrique, les cycles des nutriments ou le fonctionnement écophysologique des plantes, des modèles de croissance et de dynamique des populations, des modèles d'interactions de type proie-prédateur (rarement utilisés par les agronomes), modèles dont le point commun est d'être toujours déterministes. En agronomie, l'observation des modèles de culture actuels (« crop growth models ») montre bien la prédominance des concepts de nature « physiologique » dans la conception de ces modèles, et la façon dont ils ont influencé la représentation des processus de compétition, ou encore les relations eau-sol-plante. Issus d'un corpus de connaissances agro-physiologiques et écophysologiques, conçus pour optimiser l'utilisation des ressources par un peuplement végétal homogène, ils ont été utilisés plus récemment pour optimiser la nutrition en particulier azotée (et plus récemment encore pour évaluer les pertes par lessivage), mais leur utilisation dans une perspective plus englobante montre aujourd'hui ses limites. En fait, la quasi totalité des modèles agronomiques disponibles aujourd'hui s'intéressent au pilotage à court terme de systèmes monospécifiques ou de rotations. Adaptés à optimiser la production d'une culture via l'itinéraire technique et à travers certains facteurs bien précis (eau, azote, rayonnement), ils permettent rarement la prise en compte d'autres facteurs (comme les parasites, maladies, ravageurs, adventices) ou les pas de temps plus longs du système de culture. Ces modèles sont rares dans le domaine des plantes pérennes et, lorsqu'ils existent, ils visent toujours à simuler la production à travers la représentation de processus écophysologiques dans un peuplement homogène.

Alors que les modèles de simulation se sont multipliés ces dernières années dans le domaine de l'agronomie, de la foresterie ou de l'écologie, les modèles capables de représenter et simuler les systèmes agroforestiers restent à ce jour peu nombreux⁶³. Le modèle Hi-SAFE (High-detailed process model for Silvoarable Agroforestry For Europe), conçu dans le cadre du projet européen SAFE, couple au sein de la plateforme CAPSIS (de Coligny *et al.*, 2003) le modèle de culture STICS à un modèle arbre individuel spatialisé. Hi-SAFE vise principalement à représenter le fonctionnement du système, ce qui requiert un niveau de détail des mécanismes élevé, qui semble incompatible avec la prédiction de la dynamique et de la production de systèmes complexes sur le long terme. Le modèle YieldSAFE (Yield estimator for long-term design of silvoarable agroforestry in Europe), développé dans le même projet, répond partiellement à cet objectif en terme de production mais sans prendre en compte la dynamique et l'hétérogénéité spatiale du système.

Si les modèles agroforestiers existants permettent d'estimer les performances agro écologiques d'un système, ils ne permettent pas de représenter l'évolution de leur structure. Les systèmes agroforestiers multistrates peuvent être assimilés en foresterie à des peuplements hétérogènes (âge et espèce sont hétérogènes) régénérés par plantation (dans ce contexte, les choix techniques pourraient être intégrés dans les processus démographiques) : les modèles développés pour la simulation de ce type de peuplement sont des modèles individuels, pouvant être ou non spatialisés.

⁶³ Voir la synthèse sur ce sujet (A13 Malézieux, E., *et al.*, 2008. *Mixing plant species in cropping systems; concepts, tools and models. A review.* Agronomy for sustainable development.).

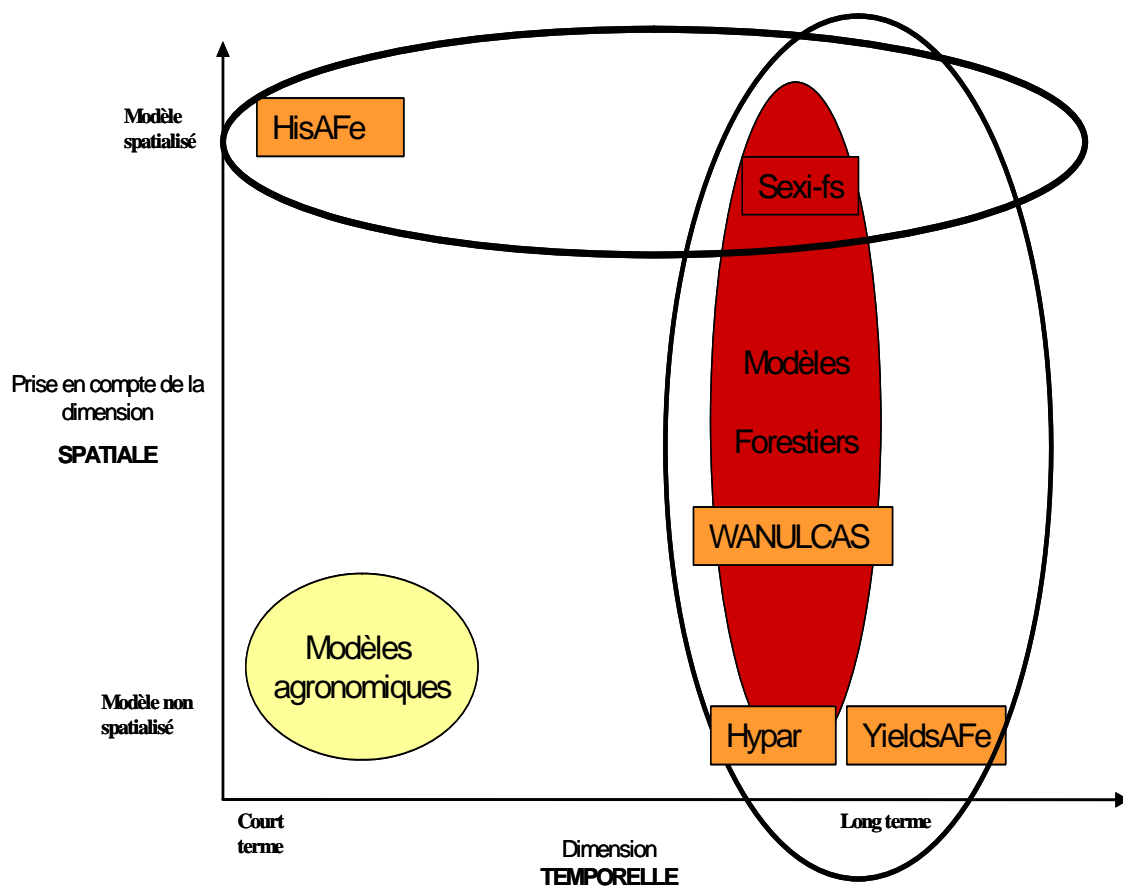


Figure 6 : Prise en compte de la dimension spatio-temporelle par les différents modèles (d'après Laurans, non publié).

Les modèles forestiers qui nous intéressent sont des **modèles de dynamique spatio-temporelle** associant une description du temps, de l'espace et de l'état du système à l'échelle de la durée d'une ou plusieurs générations (quelques dizaines d'années); ils intègrent trois processus : la croissance, la mortalité et la régénération. Un modèle **individuel** désigne un modèle d'évolution où la dynamique de chaque arbre est suivie individuellement et dépend de la valeur de certaines variables associées aux arbres en interactions avec l'arbre considéré. Les modèles **individuels spatialisés** prennent en compte la position des arbres, cette position déterminant leur voisinage et donc leur statut compétitif (Franc *et al.*, 2000). Ils présentent un caractère fonctionnel plus ou moins marqué et sont développés pour des objectifs à la fois cognitifs et prédictifs (production et dynamique de peuplements soumis à différents scénarios de gestion sylvicole). Les modèles forestiers individuels spatialisés répondent ainsi aux exigences du cahier des charges relatives à la structure du système et à sa dynamique. SExI-FS (Spatially EXplicit Individual Based Forest Simulator) développé par Grégoire Vincent (IRD) et Degi Harja (ICRAF) pour la simulation d'agroforêts, appartient à cette classe de modèles et comporte les limites intrinsèques aux modèles forestiers dans la prise en compte de la composante agronomique du système (seule la production de latex par l'hévéa est simulée). On trouve également, en écologie, des modèles individuels, souvent plus fonctionnels, orientés vers la prédiction de la composition floristique de peuplements et ses interactions avec les cycles biogéochimiques. La complémentarité des outils, et au-delà de outils, des disciplines, apparaît donc clairement : d'une part à travers l'intérêt des modèles individuels spatialisés (utilisés dans HiSAFE) pour la prise en compte de la complexité structurelle et fonctionnelle des systèmes multistrates, d'autre part à travers le concept de dynamique spatio-temporelle qui fait précisément défaut aux modèles agroforestiers (Figure 6).

La construction de nouveaux outils de simulation à même de rendre compte du rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des systèmes de culture complexe apparaît aujourd'hui nécessaire. D'un point de vue biophysique d'abord (flux d'énergie, d'eau et de nutriments), les systèmes agroforestiers reposent sur l'optimisation spatio-temporelle d'interactions écologiques entre les différents objets du système. D'un point de vue biologique, l'évolution de la structure du système à moyen et long terme dépend des pratiques des agriculteurs mais aussi de processus démographiques naturels. La représentation spatialisée de ces objets est donc souvent nécessaire, de même que la prise en compte de certains processus démographiques à l'œuvre dans ces systèmes (mortalité, régénération, compétition, etc.) sur des pas de temps longs. Les modèles devront donc simuler les principales interventions humaines (plantation -choix et disposition des espèces-, coupe, éclaircie) et les processus de croissance, de mortalité et de régénération des différentes espèces. Dans un second temps, la prise en compte des choix techniques à travers un gestionnaire de scénarios préparera l'interfaçage avec un modèle de décision et exigera une analyse préalable des pratiques et des règles de décision des agriculteurs. Les caractéristiques spécifiques des systèmes agroforestiers permettent d'assigner un certain nombre de spécifications générales au modèle recherché :

- la prise en compte de la diversité spécifique
- la représentation explicite de l'hétérogénéité de la structure spatiale du système
- la représentation de l'évolution de la structure du système sur le long terme
- la simulation de certains processus biophysiques (développement racinaire, distribution du rayonnement dans le couvert)

C'est dans ce cadre que se construisent un projet de thèse (voir encadré ci-contre) et/ou le projet de recrutement d'un chercheur à notre équipe⁶⁴, dont l'objectif sera d'élaborer un modèle spatialisé de dynamique et de production de systèmes agroforestiers multistrates afin de prévoir l'effet à moyen et long terme des choix stratégiques sur la productivité et la durabilité du système. Sur le plan de l'application, le modèle devra permettre d'évaluer à l'échelle de la parcelle des scénarios agroforestiers innovants ou d'optimiser les systèmes existants, et de tester par exemple la pertinence de différents niveaux d'intensification.

⁶⁴ Le profil a été récemment validé et priorisé par le département PERSYST et la DRS du Cirad.

Projet de thèse

Comment représenter et modéliser les relations structure-fonction dans des systèmes plurispécifiques complexes ? Cas d'application à certains systèmes agroforestiers en zone tropicale humide

Problématique et questions de recherche

En écologie, la relation diversité-fonctionnement a fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux : plus que le nombre d'espèces, il semble que ce soit la nature et la diversité des groupes fonctionnels représentés ou encore la diversité structurale du système qui déterminent le niveau de productivité et la stabilité du système. Mais dans quelle mesure la productivité d'un agrosystème dépend-elle de son niveau de diversité ? Comment caractériser la valeur fonctionnelle de la diversité dans un agrosystème ?

L'importance de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes rend nécessaire la construction de nouveaux outils à même de rendre compte de son rôle dans le fonctionnement des systèmes de culture. Par exemple, d'un point de vue biophysique, les systèmes agroforestiers reposent sur l'optimisation spatio-temporelle d'interactions écologiques entre les différents objets du système. La représentation spatialisée de ces objets est donc une nécessité, de même que la prise en compte de certains processus écologiques à l'œuvre dans ces systèmes (mortalité, régénération, compétition, facilitation, etc.) sur des pas de temps longs.

L'objectif de la thèse est de mieux comprendre et caractériser le rôle de la diversité biologique cultivée dans les performances des systèmes agroforestiers complexes et d'élaborer à cette fin un modèle spatialisé de dynamique et de production de systèmes agroforestiers multi strates. Il s'agit in fine de prévoir l'effet à moyen et long terme des choix stratégiques sur la productivité et la durabilité du système. Sur le plan de l'application, le modèle pourra ainsi permettre d'aider à évaluer à l'échelle de la parcelle des scénarios agroforestiers innovants ou d'optimiser les systèmes existants, et de tester par exemple la pertinence de différents niveaux d'intensification.

La modélisation de ces systèmes impose de simuler l'évolution temporelle de la complexité structurelle et fonctionnelle des situations culturales. Leurs caractéristiques permettent d'assigner un certain nombre de spécifications générales au modèle recherché, spécifications qui comprennent i) la prise en compte de la diversité spécifique, ii) la représentation explicite de l'hétérogénéité de la structure spatiale du système, iii) la dynamique temporelle de la structure du système, iv) certains traits du fonctionnement biophysique (développement racinaire, distribution du rayonnement dans le couvert). La complexité structurelle et fonctionnelle du système impliquera la hiérarchisation des processus biophysiques mis en jeu ainsi que des niveaux de simplification élevés.

La démarche de modélisation sera appliquée à des systèmes à base de cocotier et à des palmeraies sub-spontanées, sur deux sites d'étude (Vanuatu, Guinée) choisis sur la base d'acquis préalables en terme de données, de partenariats locaux et d'enjeux scientifiques. Elle s'appuiera notamment sur les travaux suivants :

- thèse de Nathalie Lamanda sur la caractérisation et l'évaluation de systèmes agroforestiers à base de cocotiers au Vanuatu.
- projet CIRAD CARESYS (2005-2008) sur l'analyse des pratiques et l'identification d'indicateurs agro-écologiques des systèmes agroforestiers multistrates.
- Projet FSP (Fonds de Solidarité Prioritaire) Guinée forestière.

Terrains : Guinée forestière et Vanuatu

II.6. Du champ cultivé au paysage, la problématique du changement d'échelle

En tant qu'agronome, le champ cultivé a constitué et constitue toujours un niveau d'étude privilégié⁶⁵. Mais la problématique globale de gestion des ressources naturelles implique de s'intéresser aussi à d'autres échelles, en particulier à celle du paysage. Lowrance et al. (1986) proposaient déjà de considérer la durabilité de l'agriculture comme un ensemble de systèmes hiérarchisés : alors que la durabilité « agronomique » (que l'on pourrait définir comme la capacité d'un système à produire durablement, sur un pas de temps long) se construit d'abord à l'échelle de la parcelle, les durabilités microéconomique et écologique s'expriment elles préférentiellement aux niveaux d'organisation privilégiés respectifs de l'exploitation agricole et du paysage.

Lorsque la stabilité de la production à l'échelle de l'exploitation ou du territoire est un enjeu, la solution optimale peut être recherchée dans un assolement ou une combinaison d'espèces sur un espace aux propriétés et caractéristiques variées. C'est le cas par exemple pour la culture du bananier aux Antilles pour laquelle la recherche de solutions durables visant à réduire la charge des pesticides dans les eaux passe à la fois par la conception de systèmes nouveaux associant plusieurs espèces et par une combinaison raisonnée de la localisation de ces différents systèmes à l'échelle du terroir (c'est l'un des objectifs du projet GEDUQUE⁶⁶, projet de l'appel d'offres ADD coordonné par l'UMR SYSTEM).

L'organisation des systèmes de culture dans l'espace constitue donc souvent une condition et un facteur essentiel de durabilité. Alors que l'agronomie s'est toujours intéressée de manière privilégiée à la parcelle cultivée, la nécessité de s'ouvrir à d'autres échelles plus englobantes se fait jour de manière récurrente chez les agronomes (Papy et Baudry, 2003), parfois sous l'impulsion des géographes (Deffontaines *et al.*, 1995 ; Caron, 2005). Aux niveaux d'organisation représentés par l'exploitation agricole d'une part et le terroir d'autre part, la question de la diversité biologique dans les agrosystèmes rejoint la question de la diversification en agriculture, son rôle et ses conséquences écologiques, économiques ou même sociales (AN8, AN9). La problématique de gestion des ressources naturelles et la question de la biodiversité qui lui est associée impliquent en effet de s'intéresser spécifiquement au paysage : les taches d'une mosaïque de végétation (qui incluent les parcelles cultivées dans le cas des agrosystèmes) ne fonctionnent pas indépendamment les unes des autres mais sont connectées par des flux d'énergie, de matière et de propagules qui modifient ou maintiennent des habitats et exigent des modèles spatialement explicites (Burel et Baudry, 1999). Il est ainsi impossible de procéder par simple agrégation si l'on veut comprendre le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement de l'écosystème cultivé.

Les écosystèmes peuvent se décliner à différentes échelles, de la chambre de culture à la montagne ou l'océan. De la même façon, les agrosystèmes se déclinent à différentes échelles. Le système de culture se définit au niveau du champ cultivé mais le fonctionnement de l'écosystème à l'échelle du paysage agit sur le fonctionnement du champ cultivé et, à l'inverse, le paysage agraire est souvent majoritairement composé de parcelles cultivées qui interagissent, entre elles et avec les autres éléments du paysage. De la parcelle au territoire, les aller-retours sont nécessaires pour aborder la résilience des agrosystèmes. Dans tous les cas, les systèmes s'emboîtent ou se superposent, ont souvent des limites floues, mais restent définis simultanément par leur structure et leur fonction. La parcelle cultivée, qui porte les plantes utiles, comprend aussi bioagresseurs et auxiliaires, flore et faune du sol, directement ou non directement utiles au fonctionnement des plantes cultivées, mais interagissant sur les processus et les échanges d'énergie et de matière, la dynamique de la biodiversité. Or, ces composantes de l'écosystème ont des logiques de fonctionnement qui se situent à

⁶⁵ « L'agronomie ne peut que partir de la situation du champ et y revenir » (Sébillotte, 1974)

⁶⁶ GEDUQUE : Innovations agroécologiques et organisationnelles pour une Gestion Durable de la Qualité de l'Eau dans les régions de monoculture à forts niveaux d'intrants phytosanitaires

des niveaux d'échelles plus élevés que ceux de la parcelle, et qui dépendent de la structure du paysage.

Dans ces conditions, quels sont les niveaux minima de biodiversité permettant de satisfaire aux fonctions et services de l'écosystème formé un paysage agricole ? Pour répondre à cette question, Swift *et al.* (2004) proposent d'adapter les hypothèses de Vitousek et Hooper (1993) au paysage, en supposant l'existence d'un nombre minimal d'usages des terres pour remplir les services écosystémiques à l'échelle du paysage. Le changement d'échelle nécessite dans tous les cas une reformulation des hypothèses, ainsi que la détermination de seuils critiques (comme le nombre d'espèces cultivées) à des niveaux qui varient en fonction de l'échelle considérée. Les pratiques agroforestières, qui consistent à associer espèces ligneuses et annuelles sur la même parcelle selon des ensembles plus ou moins complexes constituent déjà des systèmes pour lesquels la biodiversité joue un rôle essentiel dans le fonctionnement écologique (Torquebiau, 1992, 2000). La mise en oeuvre de ces systèmes dans un contexte territorial, au sein d'une mosaïque de parcelles, donne une dimension nouvelle à ces systèmes, permettant d'envisager des agrosystèmes plus durables, pouvant jouer un rôle décisif, y compris dans une perspective de conservation de la biodiversité (Leakey, 1999). Les systèmes agroforestiers constituent en effet des moyens efficaces d'augmenter la connectivité des paysages et de jouer ainsi un rôle décisif dans la conservation de la vie sauvage (Laurance, 2004). La conception de systèmes de culture agroforestiers dans les agricultures traditionnelles peut même jouer un rôle décisif dans les processus écologiques à l'échelle des paysages. En Guinée forestière, le développement de l'agriculture traditionnelle a eu pour effet la constitution d'îlots agroforestiers autour des villages, participant ainsi à un processus efficace de reforestation, à l'encontre des idées reçues concernant l'agriculture traditionnelle de défriche brûlis (Fairhead et Leach, 1996).

De nombreux pays se sont engagés en signant la Convention Internationale sur la Biodiversité (1992), qui a principalement un objectif de conservation incluant les ressources génétiques, les espèces sauvages animales et végétales ainsi que leurs habitats. Or l'agriculture, en tant qu'activité humaine, génère de nombreuses et importantes transformations sur les milieux naturels et sur la biodiversité qui leur est associée. Les impacts majeurs de l'agriculture sur la biodiversité relèvent :

- i) de la destruction et de la fragmentation d'habitats (biotopes) "sauvages" au profit d'habitats anthropisés. Cette dégradation d'habitats « sauvages » a des effets secondaires sur la biodiversité d'un milieu à travers le développement des activités humaines agricoles et non agricoles connexes (artisans, commerçants);
- ii) d'effets directs, liés au développement de ces activités humaines : prélèvements de biodiversité par chasse, pêche ou pour une activité commerciale ;
- iii) d'effets induits par ces activités humaines : pollutions par utilisation de pesticides (engrais chimiques, herbicides, insecticides et fongicides) affectant les espèces présentes dans le milieu (biocénose) et dégradation des milieux (biotopes) par construction de routes et de réseaux de chemins pouvant aussi favoriser la pénétration du milieu et sa fragmentation.

Pourtant, dans certaines situations, le choix de systèmes de culture adaptés permet de jouer un rôle positif sur la biodiversité : ce peut être le cas par exemple des systèmes agroforestiers en marge de massifs forestiers protégés qui, par le maintien de systèmes associant un nombre d'espèces élevées associant plantes ligneuses et herbacées disposent de propriétés spécifiques et procurent des bénéfices agroécologiques.

Projet de thèse O. Deheuvels

Impact de la structure des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers sur leur productivité et sur les habitats potentiels pour des espèces forestières : application à l'échelle de la parcelle et du paysage dans la région de Talamanca (Costa Rica)

Problématique et questions de recherche

De nombreux pays se sont engagés en signant la Convention Internationale sur la Biodiversité (1992), qui a principalement un objectif de conservation incluant les ressources génétiques, les espèces sauvages animales et végétales ainsi que leurs habitats. Or l'agriculture, en tant qu'activité humaine, génère de nombreuses et importantes transformations des milieux naturels et de la biodiversité qui leur est associée.

Pourtant, dans certaines situations, le choix de systèmes de culture adaptés joue un rôle positif sur la biodiversité : ce peut être le cas par exemple des systèmes agroforestiers en marge de massifs forestiers protégés qui, par le maintien de systèmes associant un nombre d'espèces élevés associant plantes ligneuses et herbacées disposent de propriétés spécifiques et procurent des bénéfices agroécologiques. On dispose de peu d'éléments concernant le rôle écologique de ces systèmes de culture, souvent complexes, à la fois en tant qu'éléments structurants du paysage et en tant qu'écosystèmes cultivés dont on ne sait pas encore mesurer la diversité biologique associée.

A l'intérieur des systèmes de cacaoculture, différentes pratiques agricoles ont potentiellement un impact sur la productivité du système et sur la biodiversité. Celles ci peuvent se décliner en plusieurs ensembles se succédant dans le temps et qui concernent la création, l'entretien ou la réhabilitation des parcelles. Des méthodologies permettant de caractériser ces systèmes de culture complexes dont le fonctionnement agroécologique repose sur plusieurs espèces combinées et associées restent à mettre au point. L'objet de ce travail de thèse vise à proposer une méthodologie permettant de caractériser la **productivité** et la **valeur potentielle des habitats** présents dans ces systèmes à partir de la description de leur **structure**. On s'intéressera plus particulièrement aux systèmes de culture à base de cacaoyer compte tenu de l'importance écologique, économique et sociale de ces cultures dans certaines zones tropicales et en particulier en Amérique Centrale. La thèse s'attachera à répondre aux questions suivantes :

- 1 Comment décrire, caractériser et comparer des systèmes de culture complexes à base de cacaoyer ? Quelles sont les variables pertinentes vis-à-vis i) de la productivité, ii) de la valeur en terme d'habitats potentiels ?
- 2 Quelles sont les relations entre structure du peuplement et productivité ?
- 3 Comment décrire des habitats potentiels pour différents taxons à partir de l'identification de la structure du peuplement ?
- 4 Quelle est la répartition des systèmes dans l'espace d'étude ?
- 5 Comment évaluer le rôle régional en terme de conservation ?

Terrain : Costa Rica

Organisme d'accueil (partenaire) : CATIE

Démarrage de la thèse : juin 2006

Unité de rattachement : UMR SYSTEM

Encadrement : E.Malézieux, J.Baudry

Ecole doctorale : SIBAGHE (inscription SUPAGRO)

Si, dans les régions tropicales, l'importance géographique (occupation de l'espace) et économique (cultures de rente référencées sur le marché international) de cultures pérennes telles que le cacao et le café, pour les milliers de familles qui en vivent, n'est plus à démontrer ; en revanche, on dispose de peu d'éléments concernant le rôle écologique de ces systèmes de culture, souvent complexes, à la fois en tant qu'éléments structurants du paysage et en tant qu'écosystèmes cultivés dont on ne sait pas encore mesurer la biodiversité associée.

L'évaluation et la quantification de cette biodiversité requiert aussi l'existence d'outils spécifiques. De tels outils sont-ils disponibles ? Les indicateurs de la biodiversité, largement utilisés en écologie, font aujourd'hui l'objet de nombreux questionnements, en particulier vis à vis de la pertinence de leur utilisation en agriculture. Cependant, la complexité de l'approche de la biodiversité rend quasiment impossible la définition d'outils synthétiques si l'on n'en précise pas l'objet et les limites. La mesure de la biodiversité peut-être un objectif en soi, ou un outil (pour évaluer l'état d'un écosystème par exemple, ou l'impact d'une pratique). On distingue donc des indicateurs **pour** la biodiversité ou **à partir** de la biodiversité (Duelli et Obrist, 2004). Faut-il considérer la richesse en espèces d'un système (diversité alpha) ou sa capacité à maintenir des espèces rares (valeur de conservation) ? Ces deux indices sont souvent contradictoires. L'écologie du paysage s'intéresse explicitement à ce niveau d'organisation, hiérarchiquement structuré et spatialisé (Jiango Liu et Taylor, 2002) que constitue le paysage. Elle montre que les taches d'une mosaïque de végétation (qui incluent les parcelles cultivées dans le cas des agrosystèmes) ne fonctionnent pas indépendamment les unes des autres mais sont connectées par des flux d'énergie, de matière et de propagules qui modifient ou maintiennent des habitats et exigent des modèles spatialement explicites. (Burel et Baudry, 1999). Il est ainsi impossible de procéder par simple agrégation si l'on veut comprendre le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement de l'écosystème cultivé.

L'approfondissement de ces questions dans le cadre des systèmes agroforestiers fait l'objet de la thèse d'Olivier Deheuvels, chercheur du Cirad-PERSYST récemment affecté dans l'Unité (voir encadré). Ce travail, réalisé dans le cadre des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers en Amérique centrale, contribuera à établir la base méthodologique nécessaire pour pouvoir ensuite proposer des systèmes de culture à base de plantes pérennes adaptés aux conditions de production paysannes et innovants en termes d'impact écologique. Co-encadré avec Jacques Baudry, il constitue un travail exploratoire, à l'interface entre agronomie et écologie du paysage.

La dimension spatiale des systèmes de culture agroforestiers est également abordée dans le cadre du projet FSP en Guinée forestière, à l'échelle des terroirs villageois, en collaboration avec des géographes. Des premiers résultats sont d'ores et déjà formalisés (C62). Dominique Nicolas, chercheur de l'unité dans l'équipe PERSAFT, élabore également son programme de recherche personnel dans cette perspective et apportera prochainement son soutien à ce projet.

II.7. Systèmes, terrains et partenariats

Notre premier objectif au cours du prochain quadriennal est de renforcer la cohérence de l'équipe PERSAFT, en stabilisant ses terrains et en confortant ses compétences, en particulier dans le domaine de la modélisation. La modélisation des interactions entre espèces sera un élément fort de cette structuration, avec des hypothèses communes sur les déterminants majeurs de la productivité et de la stabilité des associations. Nous restreignons volontairement dans un premier temps le champ de nos recherches aux agroforesteries tropicales de zone humide, la composante productive principale de ces systèmes étant constituée par des cultures pérennes comme le cocotier, le palmier à huile, l'hévéa, le caféier ou le cacaoyer. Ces systèmes multiespèces, au-delà des enjeux écologiques, économiques et

sociaux qu'ils représentent, constituent des systèmes « modèles » au plan scientifique pour notre unité. Toutefois, malgré ces enjeux à la fois scientifiques et stratégiques, les études portant sur les systèmes agroforestiers restent peu visibles dans la stratégie du CIRAD comme de l'INRA, et elles ont eu peu d'impact sur la formation des ingénieurs agronomes. Notre ambition est de contribuer à rendre ces recherches plus lisibles, notamment au niveau international, en ayant un rôle de catalyseur et de tête de réseau au sein de nos organismes.

Nous proposons de développer des bases expérimentales en Agroforesterie tropicale de zone humide avec des chantiers en Guinée forestière, Centre Cameroun, Vanuatu, Amérique centrale. La mise en œuvre de ces projets implique des partenariats scientifiques avec d'autres unités du Cirad, de l'Inra, de l'IRD ou du CNRS, ainsi que des partenariats internationaux. En interne, nous travaillons avec l'unité « Fonctionnement et pilotage des systèmes de plantation » (UPR 80), avec l'UMR AMAP (Botanique et bio-informatique de l'architecture des plantes) et avec l'unité « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes » (UPR 34) du département PERSYST, trois unités déjà fortement impliquées dans les recherches sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers et avec lesquelles des liens privilégiés ont été tissés. Des collaborations sont initiées avec le CEFE pour aborder les questions liées aux traits et groupes fonctionnels, ainsi qu'avec l'UPR « Dynamique des forêts naturelles tropicales ». Pour les volets liés à la conception et au pilotage de systèmes innovants, nos partenaires privilégiés sont les unités « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes » (UPR 34) et l'UMR Innovation avec lesquelles nous intervenons d'ores et déjà au Cameroun et en Guinée (Projets FSP et DURAS). Un partenariat avec l'UMR TETIS est en voie d'élaboration pour les aspects spatiaux (SIG, télédétection, etc.), en particulier sur la Guinée. Ces collaborations se sont déjà traduites par des résultats significatifs qui ont fait l'objet d'un nombre important de communications dans des congrès (C56 à C68). Cette stratégie de consolidation en interne à nos institutions permettra d'affirmer par la suite une stratégie plus volontariste de partenariat avec des institutions internationales comme l'ICRAF⁶⁷, le CIFOR⁶⁸, le CATIE⁶⁹, avec lesquelles des actions sont déjà engagées mais pourraient être fortement amplifiées. La construction d'un PCP⁷⁰ avec le CATIE, dans lequel notre équipe est fortement engagée⁷¹, constitue un point fort de cette consolidation internationale.

II.8. Conclusion

L'ensemble des réflexions qui précède nous amène à retenir 3 éléments essentiels dans notre approche des systèmes de culture : la notion d'**hétérogénéité** d'abord, celle d'**interaction entre espèces** ensuite puis enfin celle de **succession**.

Les milieux naturels ne sont uniformes ni dans l'espace ni dans le temps (Barbault, 1997). La notion d'**hétérogénéité** est donc essentielle pour aborder le fonctionnement des écosystèmes. De nombreux processus sont ainsi sensibles à l'hétérogénéité spatiale et aux flux entre les éléments. C'est également vrai pour les espaces cultivés et a fortiori lorsqu'il s'agit de peuplements cultivés **multispécifiques**. Au sein d'un écosystème, les **interactions** s'exercent entre individus (interactions intraspécifiques) et entre populations (interactions interspécifiques). On distingue en écologie des processus comme la compétition interspécifique, la facilitation, la prédation, les relations hôte-parasites, la coopération. Il

⁶⁷ World Agroforestry Center

⁶⁸ Center for International Forestry Research

⁶⁹ CATIE : Tropical Agricultural Research and Higher Education Center (Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza)

⁷⁰ Pôle de Compétence en Partenariat : forme privilégiée de collaboration du Cirad avec ses partenaires du Sud

⁷¹ B. Rapidel et O.Deheuvels, deux chercheurs de l'équipe ont été affectés en 2007 au CATIE. B. Rapidel assure la coordination de ce PCP.

convient de prendre en compte l'ensemble de ces relations pour aborder les systèmes de culture. D'un point de vue agronomique, et pour rester à l'échelle des systèmes de culture, l'étude du rôle des perturbations sur les écosystèmes telle qu'elle est pratiquée en écologie est riche d'enseignements : elle permet d'aborder explicitement les fonctions de régulation de l'écosystème, et la manière dont l'acteur substitue aux mécanismes naturels de régulation une pratique : labour et préparation du lit de semence (vs processus naturels de dispersion des graines), emploi de pesticides (vs contrôle naturel des bioagresseurs), variétés améliorées (vs processus de sélection), fertilisants chimiques (vs équilibre via la décomposition de la biomasse), brûlis (vs feu naturel). Elle peut être à l'origine de la conception de nouveaux systèmes.

Les agronomes ont souvent une vision cyclique du système de culture (retour à un état initial après un nombre n de cultures successives et de « perturbations »). Certains concepts ouvrent la voie à une vision plus évolutive des systèmes de culture. Ainsi, la notion de **succession** est centrale en écologie pour expliquer l'évolution des écosystèmes (Odum, 1969; Barbault, 1997). Comment « lire » l'évolution des systèmes de culture à la lumière de ces caractères ?

Dans notre démarche, qui se situe à l'interface entre l'agronomie et l'écologie, et, en terme de niveau d'organisation, à l'interface entre le champ cultivé et le paysage, la prise en compte de la **diversité biologique** et de l'**hétérogénéité** apparaissent ainsi comme des éléments essentiels à plusieurs égards, que nous considérerons comme une caractéristique fonctionnelle de l'écosystème considéré. Quel niveau de diversité biologique est nécessaire à la stabilité d'un système (May, 1972) ?

Les travaux d'écologie qui portent sur les écosystèmes naturels ne sont bien souvent pas transposables aux agrosystèmes sans précaution : l'agriculteur pilote son système de culture, et des interventions ciblées peuvent permettre d'obtenir une stabilité « maîtrisée ». Nous nous proposons d'analyser prioritairement le rôle de la diversité biologique **cultivée** dans le fonctionnement des systèmes de culture. Nous chercherons donc à analyser l'intérêt d'une diversité fonctionnelle au sein des écosystèmes cultivés et plus particulièrement des systèmes de culture pour l'optimisation de l'utilisation des ressources, la diminution des risques face à la variabilité pédoclimatique et aux ravageurs, et la stabilité pluri-annuelle du fonctionnement, via l'analyse des capacités de résilience et de facilitation au sein de ces systèmes.

On considèrera la notion d'organisation hiérarchique qui définit l'emboîtement des systèmes écologiques, en s'intéressant prioritairement au **champ cultivé**, ensemble d'objets biologiques, mais aussi au **paysage**, considéré comme un ensemble de champs cultivés (et d'autres objets variés, biologiques ou non). On analysera donc successivement l'hétérogénéité du champ cultivé et du paysage, en définissant les indicateurs et descripteurs pertinents pour chaque niveau d'organisation. Le concept de **système de culture**, revisité et vu comme un ensemble d'objets biologiques en interaction sur un espace donné servira de base aux études à l'échelle du champ cultivé, et de maillon pour l'analyse du paysage.

On cherchera enfin à rendre compte de l'**évolution temporelle** de la structure de l'écosystème (aux niveaux d'organisation du champ et du paysage), sur les pas de temps adaptés à ces deux échelles. Le cadre conceptuel général ici esquissé fournit un réseau d'hypothèses (dont certaines ont été développées précédemment), en particulier dans le domaine de la diversité biologique cultivée, hypothèses que nous nous proposons de tester et d'appliquer dans un certain nombre de conditions méditerranéennes et tropicales⁷².

⁷² l'axe 2 de l'UMR prend en compte des situations méditerranéennes et tropicales variées ; mon projet personnel se concentrera sur l'analyse de systèmes agroforestiers complexes en zone tropicale humide

III. Conclusion générale

S'inscrivant dans une certaine continuité avec mes travaux antérieurs, ce projet constitue néanmoins une nouvelle étape dans mes travaux de recherche. Clairement positionné dans l'axe 2 de l'UMR SYSTEM que je coordonne, dédié à l'écologie fonctionnelle du champ cultivé plurispécifique, ce projet participe et contribue à la structuration de cet axe. Orienté vers l'étude fonctionnelle des systèmes agroforestiers tropicaux humides, il mobilise directement un petit groupe de recherche (4 chercheurs du Cirad de l'Unité sur les systèmes agroforestiers), et intègre 2 nouvelles thèses. Dans un cercle plus large, ce projet mobilisera les chercheurs de l'axe 2 autour d'un cadre commun.

D'une manière plus générale, ce projet devrait contribuer au plan scientifique au rapprochement nécessaire entre agronomie systémique et écologie fonctionnelle pour aborder les systèmes complexes, et à répondre aux nouvelles questions posées par la problématique du changement d'échelle (en particulier parcelle cultivée-paysage) nécessaire à la prise en compte des questions environnementales.

Au plan institutionnel, il devrait contribuer à renforcer le positionnement international du Cirad et de l'INRA dans le domaine de l'agronomie systémique, surtout sur les systèmes de culture multiespèces. L'enjeu se situe également au niveau de la formation : le cloisonnement entre l'écologie (domaine de l'Université) et l'agronomie (domaine des écoles d'ingénieurs d'agronomie) demande à évoluer, comme le rappellent Landais *et al.* (2006). Cela implique une forte collaboration entre enseignants et chercheurs et l'élaboration d'un nouveau projet pédagogique. Je tâcherai de m'impliquer dans la construction des nouveaux masters en particulier à Montpellier. C'est donc aussi dans cette dimension pédagogique que je souhaite développer mon implication au niveau de la recherche et de l'enseignement dans le cadre du futur pôle Agropolis et de la « Faculté agronomique ».

Des enjeux importants auxquels je tâcherai modestement de contribuer !

REFERENCES

Références

Aerts R., 1999. Interspecific competition in natural plant communities : mechanisms, tradeoffs and plant-soil feedbacks. *J. Exp. Bot.*, 50, 29-37.

Alocilja E.C., J.T. Ritchie, 1993. Multicriteria optimization for a sustainable agriculture. 381-396, *in* F.W.T. Penning de Vries, P. Teng and K. Metselaar (eds.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. KLuwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas.

Altieri M.A., eds. *Agroecology. The science of sustainable agriculture*. London : ITP, 1987, second edition, 1995 ; 433p

Altieri M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, ecosystems and environment* 74 ; 19-31.

Altieri M.A., 2002. Agroecology : the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems and environment*, 93, 1-24.

Barbault R, 1997. *Ecologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère*. Paris : Dunod, cinquième édition, 326 p.

Barbault R., 2001. L'écologie et la gestion durable. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Malézieux E., Trébuil G., Jaeger M., eds., Montpellier, INRA-CIRAD, 37-49.

Bellow J.G., Nair P.K.R., 2003. Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agrosystems. *Agricultural and forest meteorology*. 114; 197-164.

Blandin P., Bergandi D., 2003. La nature avec ou sans les hommes ? In : *La Terre. La Recherche Hors Série*, 67-71.

Boiffin J., Malézieux E., Picard D., 2001. Cropping systems for the future. In *Crop Science* (eds. J. Nösberger, H.H. Geiger, P.C. Struik), CAB International, p. 261-279.

Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Baret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, G. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. M. Machet, J. M. Meynard, and R. Delecolle. 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance.I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18; 311-346.

Brocklehurst P.A., 1977. Factors controlling grain weight in wheat. *Nature*, 266, 348-349.

Brown L., Flavin C., Fench H., 2000. *State of the world 2000*. W.W. Norton and Cie, London, ISBN 0-393-04848-9, 263 pp.

Burel F, Baudry J, 1999. *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Paris : technique et documentation; 357 p.

Caldeira C.P., Pinto P.A., 1998. Linking DSSAT V3 to a relational database : the AGROSYS--DSSAT interface, *Computers And Electronics In Agriculture* (21)1, 69p.

Caron P., 2005. A quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Nature Sciences Sociétés* 13, 145-153.

Cauderon A., 1981. Sur les approches écologiques de l'agriculture. *Agronomie*, 1 (8), 611-616.

Connor D.J. 2001. Optimizing Crop Diversification. In : Nosberger J, Geiger HH, Struik PC , eds. *Crop Science : progress and prospects*. CAB International, 191-211.

Conway G., 1997. The doubly green revolution : food for all in the twenty-first century. Penguin books. London., 325 pp.

Cornelissen J.H.C. *et al.*, 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.*, 51, 335-380.

Cros M.J., Garcia F., Martin-Clouaire R., Rellier JP, 2002. Modeling and simulating agricultural production processes. ASAE Meeting Paper n°02-3037. St Joseph, Mich., ASAE.

Cruz P., Duru M., Therond O., Theau J. P, Ducourtieux C., Jouany C., Al Haj Khaled., Ansquer P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages*, 172, 335-354.

Dalgaard T., Hutchings N.J., Porter J.P., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100, 39-51.

Dauzat J. and Eroy M.N. 1997. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. *European Journal of Agronomy*. 7 ; 63-74.

Dauzat J., Rapidel B., Berger A., 2001. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants : description of the model and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109; 143-160

Dawson T., Fry R., 1998. Agriculture in Nature's image. *Tree* 13; 50-51.

Debaeke P., Nolot J.M., 2003. Evaluation de systèmes de culture à bas niveaux d'intrants : aspects agronomiques et environnementaux. *Dossier de l'environnement.*, INRA, 24, 59-61.

de Coligny, F., P. Ancelin, G. Cornu, B. Courbaud, P. Dreyfus, F. Goreaud, S. Gourlet-Fleury, C. Meredieu, and L. Saint-André. 2003. Capsis : Computer-Aided projection for Strategies in silviculture : advantages of a shared forest-modelling platform. in A. Amaro, D. Reed, and P. Soares, eds. *Modelling Forest Systems*. CABI Publishing, Wallingford., 319-323.

Deffontaines J.P., Thenail C., Baudry J., 1995. Agricultural systems and landscape patterns : how can we build a relationship? *Landscape and urban planning* 31 ; 3-10.

Deleage J-P, 1991. Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature. Paris : Editions La découverte,; 330 p.

De Wit C.T., 1978. Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. *Simulation monographs* Pudoc Wageningen.

Dogliotti, S., Rossing, W.A.H., Van Ittersum, M.K. , 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *Europ. J. Agron.*, 19, 239-250.

Dogliotti, S., Van Ittersum M.K., Rossing, W.A.H., 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale : a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 86(29-51).

Duelli P., Obrist M.K., 2004. Biodiversity indicators : the choice of values and measures. *Agriculture, ecosystems and environment.*, 98, 87-98.

Dupraz C., Capillon A., 2005. L'agroforesterie : une voie de diversification écologique de l'agriculture européenne ? *Cahier d'étude DEMETER. Economie et stratégie agricoles*, Paris, ISSN 116-2115, 101-113.

Erenstein O. , 2003. Smallholder conservation farming in the tropics : a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100, 17-37.

Evans L., 1998. *Feeding the 10 billion : plants and population growth*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-64685-5.

Ewel J.J., 1986. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. *Ann; Rev. Ecol. Syst.*, 17, 245-271.

Ewel J.J., 1999. Naturel systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry systems* 45, 1-21.

Fairhead J., Leach M., 1996. *Misreading the african landscape. Society and ecology in a forest-savanna mosaïc*. Cambridge University Press, 354 p.

Ferron P., Deguine J.P., 2004. Vers une conception agroécologique de la protection des cultures. A paraître.

Franc, A., S. Gourlet-Fleury, and N. Picard. 2000. Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes. *ENGREF*, Nancy.

Fresco L.O., Kroonenberg S.B., 1992. Time and spatial scales in ecological sustainability. *Land use policy*, july 1992, 155-168.

Fukai, 1993. Intercropping, bases of productivity. *Field Crops Research* 34 239-467.

Gary C., Wery J., Lelièvre F., 2005. Construire en partenariat des systèmes de culture viticoles durables en Languedoc. *Actes du symposium international "Territoires et enjeux du développement régional"*, Lyon, 9-11 mars 2005, 16 p. (http://www.inra.fr/rhone-alpes/symposium/pdf/session1-1_1.pdf)

Gliesmann S.R., 1990. *Agroecology. Researching the ecological basis for sustainable agriculture*. Springer, Berlin, 380 p.

Gourlet-Fleury S., Blanc L., Picard D., Sist P., Dick J., Nasi R., Swaine M., Forni E., 2005. Grouping species for predicting mixed tropical forest dynamics : looking for a stratgy. *Ann. For. Sci.* 62, 785-796.

Grossman Y.L., Dejong T.M., 1995. Maximum fruit growth potential following resource limitation during peach growth . *Annals of botany*. 75, 561-567.

Gitay H., Noble I.R., 1997. What are functional types and how should we seek them ? In : Plant functional types. Their relevance to ecosystem properties and global change. Smith T.M., Shugart H.H., Woodward F.I. (eds). Cambridge University Press, 3-19.

Gunderson L.H., 2000. Ecological resilience – In theory and application. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 31; 425-439.

Grime J.P., 1973. Competitive exclusion in herbaceous vegetation. *Nature*, 242, 344-347

Hart, R.D. 1986. Ecological framework for multiple cropping research, 40-56 in Multiple cropping systems, Francis, C.A. (ed.). Macmillan Publishing Company, New York, 1986, 383 pages.

Hatfield CB, 1997. Oil back on the global agenda. *Nature*, 387; 121

Hector A., *et al.*, 1999. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 286 ; 1123-27.

Higashi K., Hosoya K., Ezura H., 1999. Histological analysis of fruit development between two melon (*cucumis melo* L. *reticulatus*) genotypes setting a different size of fruit. *Journal of experimental botany*. 50 (539), 1593-1597.

Ho L.C., 1984. Partitioning of assimilates in fruiting tomato plants. *Plant growth regulation*. 2, 277-285.

Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe : reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, 1-25.

Holling C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and systems*, 4, 1-24.

Huxley, P. A. 1983. Comments on agroforestry classifications with special reference to plant aspects. in P. A. Huxley, ed. *Plant research and agroforestry*. ICRAF, Nairobi. ,pp161-172

Huxley P.A., 1999. *Tropical agroforestry*. Blackwell Science. 371 p.

Jackson W., 2002. Natural systems agriculture : a truly radical alternative. *Agriculture Ecosystems and Environment* 88 ; 111-117.

Jianguo Liu, Taylor W.W., 2002. *Integrating lanscape ecology into natural resource management.*, Cambridge University Press, 480p.

Jones, C.A., Kiniry J.R., 1986. *CERES-Maize : A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Press, College Station.

Jones J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, J. T. Ritchie., 2002. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 3-4, 235-365.

Jourdan C. and Rey H. 1997. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. I The model. Plant and Soil. 190 ; 217-233.

Jullien⁷³ A., 2000. Croissance, développement et qualité des fruits du bananier (*Musa* spp AAA group cv. Cavendish Grande Naine). Modélisation de la répartition des assimilats entre les fruits du régime. Thèse de doctorat. INA-PG, Paris, 89 p.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, S., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. Europ. J. Agron., 18 ; 267-288.

Lamanda⁷⁴ N. 2005. Caractérisation et évaluation agroécologique de systèmes de culture agroforestiers : une démarche appliquée aux systèmes de culture à base de cocotiers (*Cocos nucifera* L.) sur l'île de Malo, Vanuatu. Thèse de doctorat. INA-PG, Paris, 200 p.

Landais E., Boulier F., Robin P., 2006. Agronomie et agronomes : quel avenir ? In : Histoire et agronomie : entre ruptures et durée. Aeschlimann JP, Feller C., Robin P. (eds), IRD Editions, Paris. A paraître.

Laurance S.G.W., 2004. Landscape connectivity and biological corridors. In Agroforestry and biodiversity conservation in the tropical landscapes. Schröth et al., (eds.), Island Press, 50-64.

Lavorel S., Garnier E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits : revisiting the Holy Grail. Functional Ecology, 16, 545-556.

Leakey R.B., 1999. Agroforestry for biodiversity in farming systems. In : Biodiversity in agroecosystems. Collins W.W., Qualset C.O., eds., CRC Press, 127-146.

Lefroy E.C, Hobbs R.J, O'Connor M.H, Pate J.S, eds. *Agriculture as a Mimic of Natural Ecosystems*. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture, vol 37, 1999 ; 436 p.

Lévêque C. Ecologie. De l'écosystème à la biosphère. Paris : Dunod, 2001 ; 502p.

Loreau M., Hector A. 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. Nature, 412.

Loreau M., Naeem S., Inchausti P., Bengtsson J., Grime J-P., Hector A., Hooper U., Huston M. A., Raffaelli D., Schmid B., Tilman D., Wardle D.A., 2001. Biodiversity and ecosystem functioning : current knowledge and future challenges. Science 294, 804-808

Loyce C., Wery J. 2006. Les outils de l'agronome pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In »L'Agronomie aujourd'hui « Doré,T, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade (Eds.). QUAE Editions Paris, 77-95.

⁷³ Thèse encadrée avec B.Ney

⁷⁴ Thèse encadrée avec P.Martin et T.Doré

Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M., 2006. Managing wheat for ethanol production : a multiple criteria approach. In : "Working with dynamic crop models" Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (eds), Elsevier, 419-427.

Lowrance R., Hendrix P.F., Odum E.P., 1986. A hierarchical approach to sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. Vol. 1, (4), 169-173

McNeely J.A., Scherr S.J., 2003. *Ecoagriculture. Strategies to feed the world and save wild biodiversity*. Island Press, London, 323 p.

Marcelis L.F.M., 1993. Effect of assimilate supply on the growth of individual cucumber fruits. *Physiologia Plantarum*. 87, 313-320.

Marcelis, L. F. M., E. Heuvelink, and J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops : a review. *Scientia Horticulturae* 74; 83-111.

Mazoyer M, Roudart L, 1997. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Paris : Edition du Seuil, 544 p.

May, R. M. 1972. *Nature* 238, 412–414.

Meynard J.M., T. Doré, R. Habib, 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 87 ;223-236.

Meynard J.M., Savini I., 2003. La désintensification : point de vue d'un agronome. *Dossier de l'environnement de l'INRA*, 24, 23-33.

Mialet-Serra I, Dauzat J and Auclair D. 2001. Using plant architectural models for estimation of radiation transfer in a coconut-based agroforestry system. *Agrofor Syst* 53; 141-149.

Michon G., de Foresta H., Levang P., 1995. Stratégies agroforestières et développement durable : les agroforêts à Damar de Sumatra. *Natures, Sciences, Sociétés*, 1995, 3 (3), 207-221.

Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 744-766.

Munier-Jolain N., Ney B., 1998. Seed growth rate in legumes. II. Seed growth rate depends on cotyledon cell number. *Journal of experimental botany*. 49, 1971-1976.

Nair P.K.R. 1993. *An introduction to Agroforestry*. Kluwer. Dordrecht, 499p.

Nair, P. K. R. 2001. Do tropical homegardens elude science, or is it the other way around ? *Agroforestry systems* 53; 239-245

Neher D.A., Barbercheck M.F., 1999. Diversity and function in soil mesofauna. In : *Biodiversity in agroecosystems*. Collins W.W., Qualset C.O. (eds), CRC Press, 27-47.

Odum E.P., 1997. *Ecology : a bridge between science and society*. Sinauer Associates Inc. Publishers.

O'Neill Robert, 2001. Is it time to bury the ecosystem concept ? *Ecology*, 82 (12), 2001, 3275-3284.

Pannell DJ and MA Ewing, 2004. Managing secondary dryland salinity : options and challenges. *In* Fischer T et al (2004). New directions for a diverse planet : Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 September – 1 October 2004. [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au).

Passioura J.B., 1999. Can we bring a perennially peopled and productive countryside? *Agroforestry Systems*, 45; 411-421.

Papy F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation agricole. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Malézieux E., Trébuil G., Jaeger M. (eds), Editions INRA-Cirad, collection Repères, 51-74.

Papy F., Baudry J., 2003. Le système de culture : différents niveaux d'organisation territoriale à distinguer et articuler. In « *Agronomes et territoires* ». Deuxième édition des entretiens du Pradel. P. Prevost (eds) L'harmattan, 171-182.

Pimm, S.L. 1997. In search of perennial solutions, *Nature* 389, 126–127

Piper J.K. , 1999. Natural systems agriculture. In « *Biodiversity in agroecosystems* », Collins W.W. and Qualset C.O., eds., CRC Press, 167-189.

Rao M.R., Muraya P., Huxley P.P.A., 1993. Observations of some tree root systems in agroforestry intercrop situations, and their graphical representation. *Experimental Agriculture*. 29, 183-194.

Rao M.R., Nair P.K.R., Ong C.K., 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry systems*. 38, 3-50.

Robin P., Aeschlimann J.P., 2006. Eléments de réflexion sur la formation agronomique et l'agriculture de demain. In : *Histoire et agronomie : entre ruptures et durée*. Aeschlimann JP, Feller C., Robin P. (eds), IRD Editions, Paris. 457-474.

Rossing W.A.H., Meynard J.M., Van Ittersum M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems : case studies from France and the Netherlands. *Europ. J. Agron.*, 7, 271-283.

Sanchez P.A., 1995. Science in agroforestry. *Agrof. Syst.*, 30, 5-55.

Schroth, G., G. A. B. Da Fonseca, C. A. Harvey, C. Gascon, H. L. Vasconcelos, and A.-M. Izac. 2004. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Island Press. Washington ; 524 p.

Schulte, R.P.O., Lantinga, E.A., Struik, P.C., 2002. A conceptual framework for the qualification of production stability of grassland ecosystems. *Ecological Modelling* 159 (2003) 71-/99

Scopel E., Triomphe B., Goudet M., Valadares Xavier J.H., Sabourin E., Corbeels M., Macena da Silva F.A. 2005. Potential role of Conservation Agriculture in strengthening small-scale farming systems in the Brazilian Cerrados, and how to do it. In the IIIth World Congress on Conservation Agriculture, Nairobi, Kenya, 3 to 7 of October 2005. (extended summary)

Scorza R., May L.G., Purnell B., Upchurch B., 1991. Differences in number and area of mesocarp cells between small- and large-fruited peach cultivars. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 116 (5), 961-964.

Shugart H.H., 1997. Plant and ecosystem functional types. In : Plant functional types. Their relevance to ecosystem properties and global change. Smith T.M., Shugart H.H., Woodward F.I. (eds). Cambridge University Press, 20-46.

Seguin B., Brisson N., Dupouey J.L., Loustau D., 2004.- Impact des changements climatiques sur l'agriculture et la forêt. In 'L'homme face au climat', Odile Jacob, Paris.

Sébillotte M. 1974. Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cah. ORSTOM., ser. Biol. 24 ; 3-25.

Sébillotte M., 1977. Jachère, système de culture, système de production : méthodologie d'étude. JATBA, 24 (2-3), 241-264.

Sébillotte M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. Agric. Fr., 11, 906-913.

Sébillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : Les systèmes de culture », Combe L., Picard D., (eds), INRA, Paris, 166-196.

Sébillotte M., 1996. Culture (Système de), agronomie. Encyclopédia Universalis, 958-961.

Sherr S, McNeely J.A., 2007. Farming with nature. The science and practice of ecoagriculture. Island Press, Washington, 445 p.

Smith B., Burton I., Klein R.J.T., Wandel J., 2000.- An anatomy of adaptation to climate change and variability. Climatic change, 45, 223-251.

Sprugel D.G., 1991. Disturbance, equilibrium, and environmental variability : what is natural végétation in a changing environment ? Biol. Conserv., 58 (1191) 1-18

Swift M.J., Vandermeer J., Ramakrishnan P.S., Anderson J.M., Ong C.K., Hawkins B.A., 1996. Biodiversity and agroecosystem function. In : Cushman et al., (eds). Functional roles of biodiversity : a global perspective. Wiley, Chichester, 261-298.

Swift M.J., Izac A.M., van Noordwijck M., 2004. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes – are we asking the right questions ? Agriculture, ecosystems and environment 104, 113-134

Thenail C, 2002. Relationships between farm characteristics and the variation of the density of hedgerows at the level of a micro region of bocage landscape. Study case in Brittany, France. *Agricultural Systems* 71, 207-230.

Tilman D.1999. Diversity and Production in European grasslands. Science, 286, 5442, P1009-1100

Tilman D., Wedin D., Knops J., 1996. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. Nature, 379, 718-720.

Tixier⁷⁵ P., 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse de doctorat. AGRO-M, Montpellier, 223 p.

⁷⁵ Thèse encadrée avec J.Wéry

Torquebiau E., 1992. Are tropical agroforestry home gardens sustainable ? Agriculture, Ecosystems, and environment, 41 ;189-207.

Torquebiau E., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. C.R. Acad. Sciences., Paris, 323, 1009-1017.

Turner D.W., 1994. Banana and plantain. In : Environmental physiology of fruit crops. Vol. 2., CRC Press, 206-229.

Trenbath, 1993 Intercropping for the management of pests and diseases. Field Crop Res. 34, 381-405.

Vandermeer J., Van Noordwijk M., Anderson J., Ong C., Perfecto I., 1998. Global change and multispecies agroecosystems : concepts and issues. Agric. Ecosys. Env., 67, 1-22.

Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L., Goudriaan J ;, 2002. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy, 18, 3-4, 201-234.

Vitousek P.M., Hooper D.U., 1993. Biological diversity and terrestrial ecosystem biogeochemistry. In : Schulze E.D., Mooney H.A. (eds), Biodiversity and ecosystem function . Springer Verlag, Berlin, 3-14.

Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A. 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and society 9 (2), 5.

Warner K., 2006. Agroecology in action : extending agriculture through social networks. MIT Press, Cambridge, 273 p.

Warren Wilson J., 1972. Control of crop processes. In : Crop processes in controlled environment. AR Rees, KE Cockshull, DW Hand, RG Hurd (eds), Acad. Press, London, 7-30.

Wiersum, K. F. 2004. Forest gardens as an 'intermediate' land-use system in the nature-culture continuum : characteristics and future potential. Agroforestry systems 61; 121-134.

Weiner J., 2003. Ecology – the science of agriculture of the 21st century. Journal of Agricultural science, 141 ; 371-377

Wery J., Ahlawat IPS, 2006. Analysing and improving the role of grain legumes in cropping systems : a system approach illustrated on chickpea in India and Europe. Conférence invitée au "IV International Food Legumes Research Conference". New Delhi, India. 18-22 October 2005.

Westman W.E., 1978. Measuring the inertia and resilience of ecosystems. Bioscience, 28, 11 705-710.

Wood D., Lenné J.M., 1999. Agrobiodiversity : characterization, utilization and management, CABI, UK, 490 p.

Participation à l'Enseignement Supérieur et Universitaire

Participation à l'Enseignement supérieur et Universitaire

Cours ou conférences
dans des modules et
unités de valeur

Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA) / Paris

Master Sciences et Technologies du Vivant, spécialité Recherche en Agronomie (2004). « Management des systèmes de production végétale : I. Concevoir et évaluer des systèmes de culture : démarches et exemples »

Le Cirad et les enjeux de la recherche agronomique aujourd'hui (1h)

L'évaluation des systèmes de culture : concepts, outils, méthodes (3 h)

Concevoir des systèmes de culture bananiers durables (3h)

UV : la recherche en Agronomie.

La recherche en coopération au CIRAD (2 h) (depuis 1997)

UV : Milieux tropicaux

Les systèmes de culture tropicaux : Approches, outils, projets (3h) (depuis 2000)

UV Fonctionnement des cultures associées

Fonctionnement et dynamique des systèmes agroforestiers en zone tropicale humide (2 h). (depuis 2005)

Institut National d'Horticulture (INH) / Angers

Master : L'horticulture dans les pays du Sud : aspects écophysiologiques et agronomiques (8h) (2000-2006)

Université Paris Sud Orsay

DESS Innovation et qualité : Productivité et qualité des plantes tropicales (aspects écophysiologiques) (3h) (2000-2005)

Université Montpellier II

DUT : Les systèmes de culture tropicaux (3 h) (2000-2005)

Université Lyon III. Institut pour l'étude de la Francophonie et de la Mondialisation.

Diplôme d'Université (diplôme professionnel de 3^{ème} cycle) : Développement durable et agriculture dans les pays du Sud (3h) (depuis 2002)

SUPAGRO/ Montpellier

DAA agro-environnement, spécialité Production Végétale Durable

Approche de la diversité des systèmes de culture tropicaux (3h) (depuis

1999)

Les systèmes de cultures tropicaux : concepts, démarches, projets (3 h)
(2004)

Module de 2ème année : Les systèmes agroforestiers en zone tropicale
humide (3h)

CEP FLORAC - Stage Agroforesterie et agroécologie : Les systèmes
agroforestiers en zone tropicale humide : enjeux, fonctionnement. (2006)

*Master BGAE-FENEC –M2- Module optionnel UMBFG307: Analyse
comparée du fonctionnement des systèmes cultivés, prairiaux et
forestiers*

Dynamique à long terme et fonctions des systèmes agroforestiers
complexes (3h)

Master PARC : sociétés et pastoralisme

Evolution du climat et agriculture : impacts, adaptation, mitigation (3 h)
(depuis 2005)

CNEARC / Montpellier

ESAT 1 – Module d'agronomie

Modélisation et simulation de la croissance des plantes (3 h)

Méthodes d'étude des pratiques et des systèmes agricoles : les
systèmes bananiers de Guadeloupe (2 h) (2004)

Encadrement de thèses

Lamanda N. Analyse et évaluation de systèmes de culture agroforestiers.
Application aux systèmes à base de cocotiers au Vanuatu (Mélanésie).
Thèse soutenue le 29 juin à Paris (INA-PG) (co-direction T.Doré)

Tixier P., Conception assistée par modèle de systèmes de culture
durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse
soutenue le 14 décembre 2004 à Montpellier. ENSAM. Ecole Doctorale
Biologie Intégrative (Co-direction J. Wery)

Jullien A., Croissance, développement et qualité des fruits du bananier
(Musa spp groupe AAA cv Grande Naine). Modélisation de la répartition
des assimilats entre les fruits du régime. Thèse soutenue le 20 novembre
1999 à Paris. INA-PG , Ecole Doctorale ABIES (Co-direction B. Ney)

**Encadrement de thèses
en cours**

Deheuvels O., Structures et perturbations des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. Dynamiques et impacts sur la biodiversité à différentes échelles. Ecole doctorale SIBAGUE, inscription SUPAGRO 2006. Co-direction J. Baudry, J. Wery.

Jagoret P., Fonctionnement et dynamique des systèmes de culture plurispécifiques à base de cacaoyer dans un bassin de production ancien. Le cas du centre-Cameroun. Ecole doctorale SIBAGUE, inscription SUPAGRO 2007. Co-direction I. Michel, J.Wery.

**Participation à des jurys
de thèse
En tant que rapporteur**

Thiollet M. Construction d'un indicateur de qualité des eaux de surface vis à vis des produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant viticole.
Thèse soutenue le 23 septembre 2004 à l'Institut Polytechnique de Lorraine (Nancy).

**En tant que membre du
jury**

Lamanda N. Analyse et évaluation de systèmes de culture agroforestiers. Application aux systèmes à base de cocotiers au Vanuatu (Mélanésie) .
Thèse soutenue le 29 juin à l'INA-PG (Paris). ED ABIES.

Tixier P., Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse soutenue le 14 décembre 2004 à l'ENSAM (Montpellier). Ecole Doctorale BSIAE

Firdaus, Interactions H-AI-P dans la rhizosphère du maïs. Application au raisonnement de la fertilisation en sols acides tropicaux. Thèse soutenue le 13 septembre 2001 à l'ENSAM (Montpellier).

Khamsouk B., Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouillé à halloysite). Thèse soutenue le 6 juillet 2001 à l'ENSAM (Montpellier).

Jullien A., Croissance, développement et qualité des fruits du bananier (Musa spp groupe AAA cv Grande Naine). Modélisation de la répartition des assimilats entre les fruits du régime. Thèse soutenue le 15 novembre 2000 à l'INA-PG (Paris).

Maerere A., Le rejetonnage de l'ananas (ananas comosus L.Merr.). Thèse soutenue en 1996 à l'Université de Strasbourg.

Participation à comités de pilotage de thèse

Rafflegeau S. (en cours). Gestion technique d'une culture pérenne en fonction de l'évolution de la filière et du fonctionnement des exploitations : cas de l'élaéculture villageoise au sud du Cameroun (INA, direction F. Papy)

Diabaté M. (en cours) Valorisation et conservation de la biodiversité des forêts primaires pour améliorer le revenu des paysans de Guinée forestière (Université Montpellier II, direction B.Dreyfus)

Camara A. De l'analyse spatiale des dynamiques rurales au fonctionnement des agrosystèmes villageois en Guinée Forestière : éléments pour la conception d'un observatoire pour le développement rural (Université Aix-Marseille, direction JP. Cheylan)

Mathieu B. Perspectives d'évolution des systèmes de culture à sorgho repiqué au Nord-Cameroun. (INA-PG, direction T. Doré, F. Papy)

Chillet M., Rôle des composantes physiologiques dans l'élaboration de la qualité des fruits : application au cas de l'anthracnose de la banane en Guadeloupe. (Université Montpellier II, direction C.Teisson)

Normand F. Elaboration du rendement du rendement du goyavier fraise. (INA, direction R.Habib)

Encadrement d'étudiants

Morin A. Evaluation de la biodiversité cultivée dans des systèmes de culture agroforestiers dans le cadre de l'étude des performances agro-écologiques de systèmes de culture plurispécifiques traditionnels du Vanuatu. SUPAGRO, césure, 2006.

Feintrenie Laurène. Contribution à l'évaluation de systèmes de culture agroforestiers à base de cocotiers sur l'île de Malo (Vanuatu). Diplôme d'ingénieur en agronomie tropicale. CNEARC. Mémoire soutenu le 28 avril 2006 à Montpellier.

Madelaine Cécile. Analyse du fonctionnement et de la dynamique de la palmeraie subspontanée en Guinée forestière. Cas du village de Nienh. DAA soutenu le 10 novembre 2005 à l'ENGREF (Montpellier).

Bussenault Marie-Camille. Etude agroéconomique du plantain dans le canton de Santo Domingo de los Colorados, Equateur. DAA Agro-environnement, Agro-M, soutenu le 29 octobre 2004

Barbier J, Ferrand P. Les associations de culture à base de cocotier : influence des cultures intercalaires et/ou élevage sur le fonctionnement agronomique du cocotier. Synthèse bibliographique. ESAT. (2002)

**Participation à des
jury de DEA, DAA,
Mastère**

Malaval Cécile. Etude de la diversité des systèmes de culture bananiers du sud de la Basse-terre en Guadeloupe. Approche des risques environnementaux. Diplôme d'ingénieur des techniques agricoles (CNEARC) soutenu le 24/10/2002

Berger Amélie. Gestion de l'assolement dans les petites exploitations bananières de Guadeloupe : quelles alternatives à la monoculture bananière ? DAA Agroenvironnement AGRO-M, soutenu le 25/10/2002

Wirt Nathalie, Les systèmes de culture avec bananiers plantains : caractérisation de leur diversité et évaluation de leur durabilité écologique. *Diplôme de mastère of Science Développement Agricole Tropical* soutenu en juillet 2000 (CNEARC).

Sananikone Tao. Simulation de la température interne du fruit de l'ananas. Diplôme de DAA de l'INA-PG, soutenu le 5 octobre 1995 à Paris.

Narbesla Yves. Place et rôle de la culture de l'ananas dans les exploitations paysannes du delta du Mékong au Vietnam : cas de la province de Kien Giang. Diplôme de l'EITARC. Novembre 1994 (CNEARC).

Zampatti François. Influence de l'irrigation localisée sur la croissance de l'ananas et son enracinement. DUT de l'IUT d'Angers, soutenu le 1 juillet 1991.

Membre du jury de DEA BDAPC (INA) en 1999

Henry M., 2006. Carbon sequestration potentialities in Western Kenya and eligibility to clean development mechanism. ENGREF. Mémoire soutenu le 12 juillet 2006 à Montpellier.

Camara K., 2002 Perspectives d'avenir de la culture de l'ananas en Guinée : Systèmes de production, circuits de commercialisation et points de blocage. Diplôme de Mastère of Science *Développement Agricole Tropical* soutenu le 17 janvier 2002 (CNEARC).

Parveaud C-E., 2001. La conduite centrifuge du pommier. Evaluation agronomique de cette nouvelle méthode de conduite de l'arbre dans un réseau de parcelles de producteurs du Sud de la France. DAA soutenu le 12 octobre 2001 ENSAM.

Zarioh N., 1999. Conditions de l'intensification des bananeraies dans la plaine de l'Arcahaïe (Haïti). Diplôme de Mastère option AGIR (CNEARC), soutenu le 3 juin 1999 à Montpellier.

QUATRIEME PARTIE

Annexes

PARTICIPATION A DES INSTANCES SCIENTIFIQUES

Participation à des instances scientifiques

Conseils scientifiques et commissions d'évaluation

Membre nommé du Comité de Programme du département PERSYST (CIRAD) (depuis 2007)

Membre nommé du Comité de Programme du département Environnement et Sociétés (ES) du CIRAD (depuis 2007)

Membre nommé de la Commission de changement de catégorie – Passages 7 à 8 – CIRAD. (2007)

Membre du Conseil Scientifique du CETIOM (2003- 2006)

Membre du Conseil Scientifique de l'AGRO-M (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier) (2002-2006)

Membre de la Commission Scientifique Spécialisée (CSS) Agriculture Elevage Sylviculture de l'INRA (depuis 2003, avec renouvellement du mandat en 2007)

Membre de la commission d'évaluation "Sciences agronomiques et écologiques" de l'ANR (Appel d'Offres "Jeunes Chercheurs" et "blanc") (depuis 2005)

Président de la commission d'évaluation de l'UMR d'Agronomie de Grignon (2005)

Membre du comité scientifique du projet "Sustainable and Competitive Cocoa Susters in Africa - Regional Project. (2005)

Membre de la commission d'évaluation de l'Unité Commune INRA-CIRAD de San Giuliano (Corse, 2004)

Membre du comité scientifique France-Australie (Ambassade de France) (2002)

Membre du Conseil Scientifique du FSP pour la recherche sur le changement climatique dans le cadre de la coopération avec les pays en développement (MAE-MIES) (2002)

Evaluateur de projets scientifiques pour la Mission Scientifique Universitaire (MSU) dans le cadre du programme CORUS (2002)

Membre du comité inter-organismes du PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale)

Membre de la commission *Sciences de la vie* de la Région Languedoc-Roussillon (1998-2004)

Membre de la commission d'évaluation des Actions Thématiques Programmées (ATP) CIRAD (1996-2004)

Membre de la Commission de recrutement CIRAD des chercheurs dans le domaine de l'Agronomie et de la Gestion des Ressources Naturelles (21 recrutements)

Membre du conseil scientifique du dispositif pluriannuel INRA-CEMAGREF-CIRAD de recherches et d'expertises sur la multifonctionnalité de l'agriculture (2000-2002)

Membre du conseil scientifique du dispositif INRA-CIRAD *Aide à la décision* (2000-2002)

Responsable de l'organisation de l'évaluation de l'UMR SYSTEM pour l'INRA, le CIRAD, AGRO-M (2002)

Membre du jury d'admission du concours CR2 de l'IRD. Commission *sciences des systèmes écologiques* (2002 et 2001)

Membre du jury d'admission du concours DR2 de l'IRD. Commission *sciences des systèmes écologiques* (2000)

Membre de la commission d'évaluation de l'unité APC INRA Guadeloupe (1999)

Groupes de travail institutionnels

Membre du groupe de travail sur les UMR (commandité par la DG CIRAD) (2007)

Membre du groupe de travail CAP-Environnement (Concertation en Amont des Programmes sur l'Environnement) (INRA, 2006)

Membre du groupe de travail « Evaluation des Recherches en Partenariat » (INRA, 2004-2005) à l'initiative de Marion Guillou, PDG de l'INRA

Membre du groupe de Travail pour la préparation du Programme fédérateur inter-organismes Agriculture et Développement Durable (ADD, INRA, 2004)

Membre du groupe de Travail « Systèmes de culture et Gestion des Ressources Naturelles » (CIRAD, 2003) à l'initiative de Benoît Lesaffre, DG du Cirad

Rédaction du Projet Stratégique du Cirad (CIRAD, 2000)

Membre du groupe de Travail « Management » (CIRAD, 1996) à l'initiative de Bernard Bachelier, DG du Cirad

Relecture d'articles scientifiques

Revue :

Agriculture et développement

Agricultural Systems

Agronomie

European Journal of Agronomy

Fruits

Ouvrages, chapitres d'ouvrages :

L'Agronomie aujourd'hui (Doré *et al.*, ouvrage collectif, 2006)

Les modèles de culture (D.Wallach *et al.*, à paraître)

Pineapple : botany, production and uses, D.P. Bartholomew *et al.*, CABI, 2002.

Organisation de séminaires, congrès, conférences scientifiques

Membre du Comité d'Organisation de la Journée « Intensification Ecologique : du concept au terrain, quelles démarches de recherche mettre en œuvre ? », Montpellier, 30 août 2007.

Membre du comité scientifique du symposium « Territoires et enjeux du développement régional », Lyon, Ecole Normale Supérieure, 9-11 mars 2005.

Membre du Comité d'Organisation de la Journée « Ecologie du Paysage », Montpellier, 3 mars 2005.

Membre du Comité Scientifique du Colloque « *Enjeux et Perspectives de la Recherche Agronomique pour les Pays en voie de Développement* ».. Académie d'Agriculture, Paris, France, 13 octobre 2004.

Membre du Comité Scientifique du International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. 13-16 Octobre 2003, Beijing, Chine
Organisation des comités scientifiques de la délégation Ager (2 comités par an entre 2004 et 1996)

Organisation de l'atelier Agriculture biologique en zone tropicale : objet ou outil de recherche pour le Cirad. , atelier Cirad-Agro-M, 27 mars 2003, Montpellier.

Membre du comité scientifique du colloque *Organisation spatiale et gestion des ressources et territoires ruraux*, 25-27 février 2003, Montpellier.

Co-organisation du séminaire *Les espèces envahissantes*, 16 janvier 2002, Montpellier.

Membre du comité scientifique du colloque international *Land use, erosion and carbon sequestration* , 23-29 Septembre 2002, Montpellier.

Organisation du séminaire Le pilotage des agro-écosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision. E. Malézieux, G.Trébuil, M.Jaeger. Septembre 2000, Montpellier.

Organisation du séminaire interne *L'agronomie au CIRAD*, septembre 1999, Montpellier

Organisation de la Conférence électronique *Quelle agronomie au CIRAD ?*. E. Malézieux, S. Renoir, G. Trébuil, du 4 octobre au 14 novembre 1999, Montpellier.

Présidence du comité scientifique et membre du comité d'organisation du Ile Symposium International Ananas sous l'égide de l'ISHS. 20-24 février 1995. Fort de France (300 participants).

Participation à des sociétés savantes

European Society for Agronomy (ESA)
International Society for Horticultural Science (ISHS)

LISTE DES PUBLICATIONS

LISTE DE PUBLICATIONS

Le nom des étudiants encadrés en thèse est souligné

Articles scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture

- A1** **Malézieux E.**, Zhang J.B., Sinclair E.R., Bartholomew D.P., 1994. Predicting pineapple harvest date in different environments, using a computer simulation model. *Agronomy Journal*, 86, 4, 609-617.
- A2** Jullien A., **Malézieux E.**, Michaux-Ferrière N., Chillet M., Ney B., 2001. Within-bunch variability in banana fruit weight : Importance of developmental lag between fruits. *Annals of Botany*, 87, 1, 101-108.
- A3** Jullien A., Munier-Jolain, **Malézieux E.**, Chillet M., Ney B., 2001. Effect of pulp cell number and assimilate availability on dry matter accumulation rate in a banana fruit (*Musa* sp. AAA group 'Grande naine' (Cavendish subgroup). *Annals of Botany*, 88, 2, 321-330.
- A4** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel M., 2004. SIMBA-POP : a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modeling*, 180, 407-417.
- A5** Perarnaud V , Seguin B., **Malézieux E.** ,Deque M., Loustau D., 2005. Agrometeorological Research and Applications Needed To Prepare Agriculture and Forestry to 21st Century Climate Change *Climatic Change*, 70, (1-2), 319 – 340
- A6** Lamanda N., **Malézieux E.**, Martin P., 2006. Structure and dynamics of coconut-based agroforestry systems in Melanesia : a case study from the Vanuatu archipelago. *Advances in Agroforestry*, 105, 122.
- A7** Tixier P., **Malézieux E.**, Risède J-M., Dorel M., 2006. Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes : a contribution to the design of sustainable cropping systems. *Ecological Modeling*, 198, 321-331.
- A8** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel M., Bockstaller C., Girardin P., 2006. Rpest—a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk. Application to banana-based cropping systems in FWI. *European Journal of Agronomy*, 26, 71-81.
- A9** Tixier P., Chabrier C., **Malézieux E.**, 2007. Pesticide residues in Heterogeneous plant populations, a model-based approach applied to nematicides in banana (*Musa* spp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (6), 2504 – 2508.
DOI : [10.1021/jf062710f](https://doi.org/10.1021/jf062710f)
- A10** Tixier P., Dorel M., **Malézieux E.**, 2007. A model-based approach to maximise gross income by selection of banana planting date. *Biosystems Engineering*, 96 (4), 471-476.

- A11** Lamanda N., Dauzat J., Jourdan C., Martin P., **Malézieux E.**, 2008. Using 3D architectural models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. DOI 10.1007/s10457-007-9068-3
- A12** Doré T., Clermont-Dauphin C., Crozat Y., David C., Jeuffroy MH., Loyce C., Makowski D., **Malézieux E.**, Valantin-Morison M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for sustainable development*, DOI : 10.1051/agro:2007031.
- A13** **Malézieux E.**, Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2008. Mixing plant species in cropping systems; concepts, tools and models. A review. *Agronomy for sustainable development*. In Press

Articles acceptés, In Press

- A14** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel M., Wéry J. SIMBA, a comprehensive model for evaluation and prototyping of banana-based cropping systems. *Agricultural Systems*.
- A15** Jullien A., Chillet M., **Malézieux E.** Evidence for the variability of banana green-life in relation with source/sink ratio, stresses and genotypes. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*.
- A16** Madelaine C., Manlay R., Sibelet N., **Malézieux E.** Semi-wild palm groves reveal agricultural change in Forest Guinea. *Agroforestry Systems*.

Articles scientifiques dans des revues nationales à comité de lecture

- AN1** **Malézieux E.**, 1990. Répartition et évolution du déficit hydrique en Basse Côte d'Ivoire. Application à la culture de l'ananas. *Fruits*, 45, 5, 457-458.
- AN2** **Malézieux E.**, Lacoëuilhe J.J., 1991. Analyse de la variabilité des rendements chez l'ananas (*Ananas comosus* L. Merr.). I. Caractérisation, dans les conditions de Côte d'Ivoire, des fluctuations saisonnières du rendement et de certains facteurs liés à la qualité du fruit. *Fruits*, 46, 3, 227-239.
- AN3** **Malézieux E.**, Lacoëuilhe J.J., 1991. Analyse de la variabilité des rendements chez l'ananas (*Ananas comosus* L. Merr.). II. Relations entre séquence climatique et fonctionnement du peuplement végétal dans les conditions de Côte d'Ivoire. *Fruits*, 46, 4, 441-452.
- AN4** **Malézieux E.**, Côte F., Delvaux B., Hugon R., Sarah J.L., Lacoëuilhe J.J., 1991. Les relations entre la plante et le milieu chez l'ananas : quelques approches suivies. *Fruits*, 46, N° spécial.
- AN5** **Malézieux E.**, 1991. Recherche de relations entre la biomasse aérienne, la surface foliaire et l'interception du rayonnement solaire chez l'ananas. *Fruits*, 46, 5, 523-532.

- AN6** Lamanda N., **Malézieux E.**, Martin P. 2004. Organisation spatiale et dynamique des systèmes de culture à base de cocotiers (*Cocos nucifera* L.) dans une île mélanésienne. *Cahiers Agricultures* 13, 6 , 459-466
- AN7** **Malézieux E.**, Seguin B., 2004. Changement climatique et adaptation des agrosystèmes. *C.R. Académie d' Agriculture*. <http://www.academie-agriculture.fr/seances/2004/>
- AN8** **Malézieux E.**, Moustier P., 2005. La diversification dans les agricultures du Sud : à la croisée de logiques d'environnement et de marché. I. Un contexte nouveau. *Cahiers Agriculture*. 14, 3, 277-281
- AN9** **Malézieux E.**, Moustier P., 2005. La diversification dans les agricultures du Sud : à la croisée de logiques d'environnement et de marché. II. Questions, outils et méthodes de recherche. *Cahiers Agriculture*. 14, 4, 375-382.
- AN10** Bonin M., Cattan P., Dorel M., **Malézieux E.**, 2006. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux en culture de banane en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. *C.R. Académie d' Agriculture*.

Chapitres d'ouvrages scientifiques

- B1** Bartholomew D.P., **Malézieux E.**, 1994. Pineapple. In : Schaffer B. (ed.), Andersen P.C. (ed.), *Handbook of environmental physiology of fruit crops. Volume II : Sub-tropical and tropical crops*. Boca Raton, Etats-Unis, CRC, vol. 2, 243-292.
- B2** Coppens D'Eeckenbrugge G., Leal F., Duval M.F., **Malézieux E.**, 1997. L'ananas. In : *L'amélioration des plantes tropicales*. Montpellier, France, CIRAD, 37-60. *Repères*.
- B3** Coppens D'Eeckenbrugge G., Leal F., Duval M.F., **Malézieux E.**, 2001. Pineapple. In : *Tropical plant breeding*. Montpellier, France, CIRAD, 402-424. *Repères*.
- B4** **Malézieux E.**, Trébuil G., Jaeger M., 2001. Modéliser les agroécosystèmes. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Malézieux E. et al. (eds). Collection Repères, édition INRA-CIRAD, 17-33.
- B5** Boiffin J., **Malézieux E.**, Picard D., 2001. Cropping systems for the future. In : *Crop science : Progress and Prospects*. Nosberger J. et al., eds. CABI, 261-279.
- B6** **Malézieux E.**, Côte F.X., Bartholomew D.P., 2003. Crop environment, plant growth and physiology. In : *The Pineapple, botany, production, and uses*. Eds. : D.P. Bartholomew, R. Paull, K. Rohrbach, CABI, 69-107.
- B7** **Malézieux E.**, Bartholomew D.P., 2003. Plant nutrition. In : *The Pineapple, botany, production, and uses*. Eds. : D.P. Bartholomew, R. Paull, K. Rohrbach, CABI, 143-165.
- B8** Bartholomew D.P., **Malézieux E.**, Sinclair E., 2003. Inflorescence and fruit development and yield. In : *The Pineapple, botany, production, and uses*. Eds. : D.P. Bartholomew, R. Paull, K. Rohrbach, CABI, 167-202.

- B9** Lamanda N., **Malézieux E.** and Martin P., 2006. Structure and dynamics of coconut based agroforestry systems in Melanesia : a case-study from the Vanuatu archipelago. In : Advances in Agroforestry. "*Tropical homegardens, a time-tested example of sustainable agroforestry*". B.M. Kumar and P.K.R Nair (eds). Springer, 105-120.
- B10** Bonin M., Cattan P., Dorel M., **Malézieux E.**, 2006. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux. Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. In : *Agronomes et Innovations*. Ed : Caneill J. (ed.). L'Harmattan., 123-135.
- B11** Jagoret P., **Malézieux E.**, 2008. La diversification agroforestière : une innovation paysanne pour l'installation de cacaoyères en savanne – Le cas du centre Cameroun – In : *Agroforêts en Afrique*. Ed : F. Ruf – A paraître.

Thèse et mémoire diplômants

- T1** **Malézieux E.**, 1984. Analyse des systèmes de production de quelques exploitations productrices d'ananas frais en Côte d'Ivoire. Rapport de mémoire de DAA Paris, France, INA-PG, 105 p.
- T2** **Malézieux E.**, 1988. Croissance et élaboration du rendement de l'ananas (*Ananas comosus* L. Merr.). Paris, France, INA-PG, . Thèse de Doctorat de l'INA-PG, 217p.

Edition scientifique : Ouvrages et cdroms

- E1** **Malézieux E.**, Renoir S., Trébuil G., 2000. Quelle agronomie au Cirad ? Actes de la conférence électronique Ager, 4 octobre au 4 novembre 1999. Montpellier, France, Cirad.
- E2** **Malézieux E.(ed)**, Trébuil G.(ed), 2000. L'agronomie et la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective. Montpellier, France, CIRAD-AGER, n. 1, 55 p. Documents de la Direction Scientifique.
- E3** **Malézieux E. (ed)**, Trébuil G. (ed), Jaeger M.(ed), 2001. Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. Collection Repères, édition INRA-CIRAD, 446 p.
- E4** **Malézieux E.**, Wery J., 2003. Actes de l'atelier *Agriculture biologique en zone tropicale : objet ou outil de recherche pour le Cirad*. Conférences-débat pour les chercheurs du Cirad préparées et animées par les étudiants et enseignants du module « AB » de l'Agro.M. 27 mars 2003, Montpellier, France, Cirad.
- E5** **Malézieux E.** 2004. Eco-agriculture, agriculture raisonnée, agriculture biologique. Eléments pour une discussion. [CD-ROM]. In : Réunion annuelle Flhor, Montpellier, 5-9 juillet 2004. Montpellier : CIRAD, 24 p. Réunion annuelle FLHOR, 2004-07-05/2004-07-09, Montpellier, France
- E6** **Malézieux E. (ed)**, 2004. *Agricultures du Sud, forêts tropicales, effet de serre. De nouveaux défis pour la recherche agronomique*. Edition Cirad, 52p.

Communications dans la presse scientifique, articles de revue à caractère technique ou vulgarisation

- P1** Dole B., **Malézieux E.**, 1994. Outils et diagnostic de la préparation du sol en culture d'ananas. *Afrique Agriculture*, 246, 68-69.
- P2** Boubals D., **Malézieux E.**, 1995. La viticulture équatoriale : le modèle colombien. *Le progrès agricole et viticole*, 6, 132-142.
- P3** Seguin B., **Malézieux E.**, 2002. Changement climatique et effet de serre : quelles contraintes pour les agricultures du Sud ? In : *Mémento de l'agronome*. Montpellier, CIRAD-GRET-MAE [CD-ROM]
- P4** **Malézieux E.**, Hamel O., 2002 Réchauffement climatique : l'agriculture et la forêt contre l'effet de serre. [Cd-Rom], in *Mémento de l'agronome*. - Montpellier, CIRAD-GRET-MAE (CD-ROM).
- P5** **Malézieux E.**, 2004 : Adapter l'agriculture à la nouvelle donne climatique. *La Recherche*, 378, 14-15.
- P6** Seguin B., **Malézieux E.**, 2004. Champs et forêts sous influence. *60 millions de consommateurs*, 117, 18-20.

Conférences et communications à congrès scientifiques Pour les communications orales, le nom de l'orateur est suivi d'un astérisque

- C1** **Malézieux E.**, 1986. A model of yield elaboration : the case of pineapple. s.l., Etats-Unis, s.n., International Horticultural Congress. 22, 1986, Davis, Etats-Unis. [poster]
- C2** **Malézieux E.**, 1986. Etude d'un peuplement végétal d'ananas. Analyse de l'hétérogénéité intra-peuplement. France, CIRAD-IRFA, document n. 40, 32p. Réunion annuelle IRFA, 1986/09, Montpellier, France.
- C3** **Malézieux E.**, 1986. La formation de l'inflorescence d'ananas : modèle de prévision du nombre de fleurs. CIRAD-IRFA, document interne n. 33, 11 p. Réunion annuelle IRFA, 1986/09, Montpellier, France.
- C4** **Malézieux* E.**, 1986. Note sur l'élaboration du rendement de l'ananas. Analyse de la croissance après le traitement d'induction florale. In : *Réunion annuelle IRFA*. s.l., France, IRFA, 18 p., document interne n. 32. Réunion Annuelle IRFA, 1986, France.
- C5** **Malézieux E.**, 1986. Note sur la croissance végétative de l'ananas. In : *Réunion annuelle IRFA*. s.l., France, IRFA, 25 p., document interne n. 41. Réunion Annuelle IRFA, 1986, France.
- C6** **Malézieux* E.**, 1986. Contribution à l'analyse de systèmes de productions agricoles en Basse Côte d'Ivoire : l'analyse du fonctionnement de quelques exploitations agricoles

productrices d'ananas dans un village de l'Est-Comoé. Interactions système de production-système de culture-itinéraire technique. France, CIRAD-IRFA, document n. 34, 28 p. Réunion annuelle IRFA, 1986/09, Montpellier, France.

- C7** **Malézieux* E.**, Sebillotte M., 1990. Relations entre les processus de croissance et l'élaboration du rendement chez l'ananas. I. Mise au point d'un schéma d'élaboration du rendement. In : *Réunion annuelle IRFA*. s.l., Réunion annuelle IRFA, 1990, France.
- C8** **Malézieux* E.**, Sebillotte M., 1990. Relations entre les processus de croissance et l'élaboration du rendement chez l'ananas. II. Rôle de la biomasse présente à l'induction florale. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C9** **Malézieux E.**, Sebillotte M., 1990. Relations entre les processus de croissance et l'élaboration du rendement chez l'ananas. III. Rôle de la compétition intraspécifique. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C10** **Malézieux* E.**, Sebillotte M., 1990. Relations entre les processus de croissance et l'élaboration du rendement chez l'ananas. IV. Variabilité climatique et élaboration du rendement. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C11** **Malézieux E.**, Picasso C., 1990. Etude de faisabilité en culture d'ananas. In : *Réunion annuelle IRFA*. 7 p., document interne n. 59. Réunion annuelle IRFA, 1990, France.
- C12** **Malézieux E.**, Dole B., 1990. Etude des coûts de production sur une plantation d'ananas frais en Côte d'Ivoire. In : *Réunion annuelle IRFA*. 6 p., document interne n. 21. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C13** **Malézieux* E.**, Hugon R., 1990. Impact des nématodes sur le rendement de l'ananas : essai de quantification. In : *Réunion annuelle IRFA*. 8 p., document interne n. 28. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C14** **Malézieux* E.**, 1990. Interception du rayonnement solaire par un couvert d'ananas. Relation avec l'indice foliaire. In : *Réunion annuelle IRFA*. 7 p., document interne n. 38. Réunion Annuelle IRFA, 1990, France.
- C16** **Malézieux* E.**, 1990. L'ananas en Côte d'Ivoire : structure de la production. In : *Réunion annuelle IRFA*. 10 p., document interne n. 45. Réunion annuelle IRFA, 1990, France.
- C17** **Malézieux E.**, 1990. A simulation model of pineapple plant growth during vegetative stage. International Horticultural Congress. 23, 1990, Florence, Italie.
- C18** Perrier X., Lacoeyllhe J.J., **Malézieux* E.**, 1993. An expert system for pineapple disorder diagnosis. *International pineapple symposium*. 1992/11/02-06, Honolulu, Etats-Unis. *Acta Horticulturae*. Wageningen, ISHS, p.197-204
- C19** **Malézieux* E.**, Zhang J., Bartholomew D.P., Sinclair E.R., 1993. Predicting pineapple harvest date in different environments using a computer simulation model. In : *Memorias del Primer simposio latinoamericano de pinicultura, Cali, 25-29 mai 1993*. s.l., Colombie, s.n., . Simposio Latinoamericano de Pinicultura, 1993/05/25-29, Colombie.
- C20** **Malézieux* E.**, 1993. Dry matter accumulation and yield elaboration of pineapple in Cote

d'Ivoire. In : *International pineapple symposium*. Wageningen, France, ISHS, p.149-157. International Pineapple Symposium. 1, 1992/11/02-06, Honolulu, Etats-Unis.

- C21** **Malézieux* E.**, 1993. Simulation de la croissance et du développement de l'ananas : Présentation du logiciel ALOHA-PINEAPPLE v. 2.1. In : CIRAD-AGER, CIRAD-FLHOR., *Quelques méthodes d'étude des itinéraires techniques et des systèmes de culture des fruitiers non ligneux*. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, p. 7 (1 p.). Réunion AGER, 1993/09/07, Montpellier, France.
- C22** Zhang J., **Malézieux E.**, Bartholomew D.P., 1994. ALOHA-PINEAPPLE v. 2.1 : a computer model to predict the growth, development and yield of pineapple. s.l., Japon, s.n., . International Horticultural Congress. 24, 1994, Kyoto, Japon. [poster]
- C23** **Malézieux* E.**, 1994. Perspectives d'emploi d'outils informatiques. In : Rencontres interprofessionnelles sur l'ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Conclusions, recommandations. Exposés et débats. Rungis, France, COLEACP, p. 89-91. Rencontres Interprofessionnelles sur l'Ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre, 1994/06/08-09, Rungis, France.
- C24** **Malézieux* E.**, 1994. Incidences des opérations de plantations sur la qualité et la programmation de la production. In : Rencontres interprofessionnelles sur l'ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Conclusions, recommandations. Exposés et débats. Rungis, France, COLEACP, p. 55-58. Rencontres Interprofessionnelles sur l'Ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre, 1994/06/08-09, Rungis, France.
- C25** Gaillard J.P., **Malézieux* E.**, 1994. Perspectives et schéma d'un programme régional de recherche axé sur une compétitivité améliorée au sein de la filière ananas. In : *Rencontres interprofessionnelles sur l'ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Conclusions, recommandations. Exposés et débats*. Rungis, France, COLEACP, p. 119-125. Rencontres Interprofessionnelles sur l'Ananas d'Afrique de l'Ouest et du Centre, 1994/06/08-09, Rungis, France.
- C26** **Malézieux E.**, Marlet S., 1995. Milieux inondés et inondables – Synthèse de session. In : *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides*. Montpellier, France, p. 162-163. Actes du séminaire, 13-17 novembre 1995, Montpellier, France.
- C27** **Malézieux* E.**, 1997. De l'analyse de la diversité à la diversification des agricultures : quelles nouvelles démarches de recherche?. In : *Réunion annuelle FLHOR*. s.l., France, FLHOR, . Réunion annuelle FLHOR, 1997, France. [conférence invitée]
- C28** **Malézieux E.**, 1998. Synopse des travaux. In : Martin Prével P. (ed.), Hugon R. (ed.), *Proceedings of the second international pineapple symposium*. Wageningen, Pays-Bas, ISHS, n. 425, p. 27-34. International Pineapple Symposium. 2, 1995/02/20-24, Trois-Ilets, Martinique. *Acta Horticulturae*. [conférence invitée]
- C29** Zhang J., **Malézieux* E.**, Bartholomew D.P., 1998. ALOHA-PINEAPPLE v.2.1 : a computer model to predict the growth, development and yield of pineapple. *Proceedings of the second international pineapple symposium* . Wageningen, Pays-Bas, ISHS, n. 425, p. 287-296. International Pineapple Symposium 2, 1995/02/20-24, Trois-Ilets, Martinique. *Acta Horticulturae*

- C30** Nahon* D., Bourgeon G., Ganry F., Guillobez S., Lucas Y., **Malézieux E.**, Maraux F., Marlet S., 2000. Sustainable management of the soil resources : A challenge in geosciences. In : *31st International Geological Congress, Rio de Janeiro (Brazil), August 06-17, 2000*. s.l., Brésil, s.n., 40 p. International Geological Congress. 31, 2000/08/06-17, Rio de Janeiro, Brésil.
- C31** Marie F., **Malézieux E.**, Marchal J., Perrier X., 2000. On farm approach of pineapple fruitlet core rot disease in Martinique. In : *Proceedings of the Third International Pineapple Symposium, Pattaya, Thailand, 17-20 november 1998*. La Haye, Pays-Bas, ISHS, p. 261-263. International Pineapple Symposium. 3, 1998/11/17-20, Pattaya, Thaïlande.
- C32** **Malézieux* E.**, 2000. Global network for pineapple research. In : *Proceedings of the Third International Pineapple Symposium, Pattaya, Thailand, 17-20 november 1998*. La Haye, Pays-Bas, ISHS, p. 35-47. International Pineapple Symposium. 3, 1998/11/17-20, Pattaya, Thaïlande. [conférence invitée]
- C33** Jullien A., **Malézieux E.**, Chillet M., Ney B., 2000. Pulp cell number in banana fruit (*Musa* spp. 'AAA' group cv 'Cavendish Grande Naine') as a sink strength factor for fruit filling rate. In : *Meeting future human needs*. s.l., Allemagne, s.n., [1] p. International Crop Science Congress. 3, 2000/08/17-22, Hambourg, Allemagne. [poster]
- C34** Jullien A., Chillet M., **Malézieux E.**, Ney B., 2000. Relation between banana fruit (*Musa* spp 'AAA' group cv 'Cavendish Grande Naine') weight at harvest and pulp cell number . In : *International Symposium on Tropical and Subtropical Fruits, 26th november-1st december 2000, Cairns, Australia*. s.l., France, s.n., [1] p. International Symposium on Tropical and Subtropical Fruits, 2000/11/26-2000/12/01, Cairns, Australie. [poster]
- C35** Boiffin J., **Malézieux E.**, Picard* D., 2000. Cropping systems for the future. In : *Meeting future human needs*. s.l., Allemagne, 23 p. International Crop Science Congress. 3, 2000/08/17-22, Hambourg, Allemagne. [conférence invitée]
- C36** Jullien A., Chillet M. **Malézieux E.**, 2001. Relationships between banana fruit green life, fruit age and developmental stage for different growing conditions. International congress on post harvest, Manilla, Philippines. [poster]
- C37** Seguin* B., **Malézieux E.**, 2002. Changements climatiques et effet de serre : quelles contraintes pour les agricultures du Sud ? In : *Agricultures du Sud face aux défis écologiques et économiques mondiaux : regards sur les rizicultures*. Salon International de l'Agriculture. 25 février 2002, Paris, France. [conférence invitée]
- C38** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel. M., 2002. Use of a cohort population model to simulate harvest dynamics in multi-cycle banana cropping systems. VII Congress of the European Society for Agronomy. 15-18 july 2002, Cordoba, Spain. Book of proceedings, 333-334. [poster]
- C39** Seguin* B., **Malézieux E.**, 2002. L'agriculture et la forêt contre l'effet de serre. Journée Nature, sociétés et développement durable. 29 août 2002, Montpellier. [conférence invitée]
- C40** Perarnaud* V., Seguin B., **Malézieux E.**, Deque M., Loustau D., 2002. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st century climate change. International Workshop on reducing vulnerability of agriculture and forestry to climate variability and climate change. 7-9 October

2002. Ljubljana, Slovenia.

- C41** Lamanda* N., **Malézieux E.**, Martin P. 2003. Cocoteraies et jardins vivriers dans les îles mélanésiennes : diversité spatiale et dynamique temporelle des systèmes de culture. Le cas de Malo (Vanuatu). Colloque Organisation spatiale et gestion des ressources et territoires ruraux, 25-27 février 2003, Montpellier. 11 p. Cdrom, .
- C42** **Malézieux* E.**, Seguin B., L'agriculture : évolution ou révolution ? Conférence invitée à la Journée du Développement Durable (JDD 2004) le 18 juin 2004 à Montpellier : Restitution des conférences et débats sur "Le changement climatique : risques ou opportunités" en ligne à l'adresse : www.agropolis.fr/jdd2004/
- C43** Lelong C., Lesponne C., Lamanda N., Lainé G., **Malézieux E.**, 2004. Understanding the Spatial Structure of Agroforestry Systems using Very High Resolution Remote Sensing : an Application to Coconut-based Systems in Melanesia . First World Congress of Agroforestry, Orlando, USA, 27/6-2/7/2004, book of proceedings, 191. [poster]
- C44** Lamanda N., **Malézieux E.**, Rounsard O., Joffre R., Martin P., 2004. Soil Organic Matter in Coconut-based Agroforestry Systems in Vanuatu : a Key to Sustainability? First World Congress of Agroforestry, Orlando, USA, 27/6-2/7/2004, book of proceedings, 314. [poster]
- C45** Lamanda N., **Malézieux E.**, Martin P., 2004. Characterization of Coconut-based Agroforestry Systems in Melanesia, a Prerequisite for their Agroecological Evaluation. First World Congress of Agroforestry, Orlando, USA, 27/6-2/7/2004, book of proceedings, 376. [poster]
- C46** Lamanda N., Dauzat J., Jourdan C., **Malézieux E.**, Martin P., 2004. Using 3D Architectural Models for Evaluation of Smallholder Coconut-based Agroforestry Systems. First World Congress of Agroforestry, Orlando, USA. 27/6-2/7/2004, Book of proceedings, 188. [poster]
- C47** **Malézieux* E.**, Petit-Hughenin P., 2004. Researches on cocoa. Public/private partnership in agroforestry and development. Panel. First World Congress of Agroforestry, Orlando, USA. 27/6-2/7/2004 , [conférence invitée]
- C48** Achard R., **Malézieux E.**, Robin P., Ganry J., 2004. Role and status of plantain in agroforestry cropping systems in South West Cameroun. Which pathways to productive and sustainable systems? International Horticultural Congress, 15-18 August 2002, Toronto, Canada. Acta Horticulturae, 638, 101-108. [poster]
- C49** Tixier P., **Malézieux* E.**, Dorel M., 2004 Linking crop models and agro-environmental indicators : a new approach for the dynamic assessment of cropping systems. An application to banana cropping systems in the French West Indies. VIII ESA Congress, Copenhagen. Book of proceedings, 677-678.
- C50** **Malézieux* E.**, Dorel M, Tixier P., Ganry J.,. 2004. Reintroducing agrobiodiversity to design more sustainable banana cropping systems in the French West Indies. VIII ESA Congress, Copenhagen. Book of proceedings, 939-940.
- C51** Bonin* M., Cattan P., Dorel M., **Malézieux E.**, 2004. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux en culture de banane en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. Les Entretiens du Pradel,

« Agronomes et Innovations », 8-10 septembre 2004, Le Pradel.

- C52** **Malézieux* E.**, Seguin B., 2004. Changement climatique et adaptation des agrosystèmes. Colloque « Enjeux et perspectives de la recherche agronomique des pays en développement », 13 octobre 2004, Paris. [conférence invitée]
- C53** Tixier P., **Malézieux* E.**, Dorel M., Wéry J., 2004 SIMBA : a comprehensive model for agroecological assessment and prototyping of banana based cropping systems. An application to banana cropping systems in the French West Indies. In Fischer T. et al. (2004) *New directions for a diverse planet*. Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australie, 2 septembre- 1 octobre 2004. [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au).
- C54** Nicolas D., **Malézieux* E.**, 2005. Les cultures pérennes : implications pour l'Ecologie du Paysage ». Communication à la Journée « Ecologie du Paysage », Montpellier, 3 mars 2005. [cd rom]
- C55** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel M., Ganry J., Wery J., 2006. Prototyping sustainable banana based cropping systems with the SIMBA model, 27th International Horticulture Congress, Séoul, August 16-19, 2006. Additional Book of proceedings
- C56** **Malézieux E.**, Laurans M., Deheuvels O., Lamanda N., 2007. Linking biodiversity and sustainability in agroecosystems : the case of agroforestry systems in the humid tropics. ECOSUMMIT 2007, Beijing, China, 22-27 mai 2007, Book of proceedings, p. 74
- C57** Tixier P., **Malézieux E.**, 2007. A food web based model for cropping system simulation (B9) : a first application to banana systems. ECOSUMMIT 2007, Beijing, China, 22-27 mai 2007, Book of proceedings, p. 247.
- C58** **Malézieux E.**, 2007. Comment la production agricole et forestière dans les pays du Sud peut contribuer à la préservation du climat et de la biodiversité ? Le cas des Systèmes agroforestiers dans les zones tropicales humides. Conférence Rainforest Alliance, Museum d'Histoire Naturelle, Paris, 31 mai 2007. [conférence invitée]
http://doc.ethicity.net/Compte_rendu_conf_Rainforest_Alliance_mai07.pdf
- C59** Tixier P., Achard R., Chabrier C., Salmon F., Dorel M., Risède J.M., **Malézieux E.**, 2007. Réintroduction de la biodiversité dans les systèmes de culture à base de bananiers. Communication à la Journée « L'intensification écologique : du concept au terrain, quelles démarches de recherche mettre en œuvre », 30 août 2007, Montpellier, France. [conférence invitée]
- C60** **Malézieux E.** Les systèmes agroforestiers : une solution pour et par la gestion de la biodiversité ? Communication à la Journée « L'intensification écologique : du concept au terrain, quelles démarches de recherche mettre en œuvre », 30 août 2007, Montpellier, France. [conférence invitée]
- C61** Tixier P., **Malézieux E.**, Dorel M., Cote F.X., Wery J., 2007. How to design a model for prototyping cropping systems ? Example of SIMBA for banana based systems. Farming Systems Design 2007, 10-12 September, Catania, Italy.
- C62** Lamanda N., Camara A., Diabaté M., Kolie D., Kalms J.M., **Malézieux E.**, Cheylan J.P., 2007. Spatio-temporal extension of agroforestry systems in "Guinée Forestière" (Guinea,

West Africa). Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

- C63** Jagoret P., **Malézieux E.** .2007, Complex cocoa agroforests can be successfully established on savannas : a local innovation in the central region of Cameroon. Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- C64** Lamanda N., Morin A., **Malézieux E.**, 2007. Agrobiodiversity in food crop gardens and in coconut-based agroforestry systems in the northern islands of Vanuatu (Melanesia). Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- C65** Diabaté M., Lamanda N., Wagler C., **Malézieux E.**, de Foresta H., 2007. Farmers' contribution to the conservation of biodiversity : the coffee-based agroforestry systems in "Guinée Forestière" (Guinea, West Africa). Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- C66** **Malézieux E.**, Lamanda N., Laurans M., Tassin J., Gourlet-Fleury S., 2007. Plant Functional Types and Traits : their relevance for a better understand of the functioning and properties of Agroforestry Systems. Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- C67** Deheuvels O., Dubois A., Avelino J., **Malézieux E.**, 2007. Agricultural practices and their interactions with biodiversity in cocoa cultivated landscapes. Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- C68** Deheuvels O., Dubois A., Somarriba E., **Malézieux E.**, 2007. Farmers Management and Restoration of Cocoa Agroforestry Systems in Central America : the role of the associated trees in the restoration process. Second International Symposium on Multistrata Agroforestry Systems with perennial crops. 17-21 Septembre 2007, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Rapports de groupes de travail et animation scientifique

- G1** CIRAD, 1996 (collectif). Organisation et modes de fonctionnement du CIRAD : éléments de diagnostic et recommandations. Groupe de travail Management. CIRAD, Paris, France, 69p.
- G2** CIRAD, 1997 (collectif). Rapport du groupe de travail « bases agronomiques de la production végétale. Propositions pour un programme CIRAD ».Paris, France, CIRAD .
- G3** **Malézieux E.**, Trébuil G., 2000. Pour un continuum de l'agronomie au développement local. In : L'agronomie et la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective. Montpellier, France, CIRAD-AGER, n. 1, p. 7-15. Documents de la Direction Scientifique.
- G4** **Malézieux E.**, Trébuil G., De Lattre M., 2000. Eléments d'analyse sur l'évolution des recherches en agronomie. In : L'agronomie et la gestion de l'environnement et des

ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective. Montpellier, France, CIRAD-AGER, n. 1, p. 17-20. Documents de la Direction Scientifique.

- G5** **Malézieux E.**, Trébuil G., Renoir S., 2000. Caractérisation et répartition des effectifs du champ Ager. In : *L'agronomie et la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective*. Montpellier, France, CIRAD, p. 21-28. Documents de la Direction Scientifique.
- G6** Trébuil G., **Malézieux E.**, Guinet I., 2000. La conférence électronique Ager sur l'agronomie au Cirad : principaux apports et propositions. Synthèse des débats (4 octobre-19 novembre 1999). In : *L'agronomie et la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective*. Montpellier, France, CIRAD, p. 29-36. Documents de la Direction Scientifique.
- G7** Barale M., Trébuil G., **Malézieux E.**, 2000. Publications récentes du Cirad dans le champ scientifique Ager. In : *L'agronomie et la gestion de l'environnement et des ressources naturelles au Cirad : Réflexions, propositions et éléments de prospective*. Montpellier, France, CIRAD, p. 37-55. Documents de la Direction Scientifique.
- G8** **Malézieux E.**, 2000. Quelle agronomie pour une agriculture durable ? – Propositions pour un rapprochement INRA-Cirad. Cirad info, 103-1,10
- G9** Boiffin J., **Malézieux E.**, 2000. Rapprochement INRA-Cirad : Rapport du groupe « agriculture durable ». s.l., France, S.n., 8 p.
- G10** CIRAD, 2002 (collectif). Cirad 2010. Projet stratégique. Quel Cirad pour demain ? Restitution finale des débats. Cédérom, juillet 2002.
- G11** CIRAD, 2002 (collectif). Projet stratégique du CIRAD 2001-2010. Participation au groupe de travail restreint.
- G12** CIRAD, 2003 (collectif). Rapport du Groupe de Travail *Systèmes de culture et gestion des ressources naturelles*. Intranet Cirad, 2003.
- G13** INRA ; 2004 . Participation à la synthèse « Les systèmes de production et de transformation agricoles et agro-industriels : capacité d'évolution et d'adaptation face aux enjeux du développement durable » In : « Agriculture et Développement Durable : Enjeux et Questions de Recherche », Boiffin J., Hubert B., Durand N., eds., INRA, Paris. 2005, 55-59
- G14.** INRA, 2005 (collectif). Les recherches en partenariat à l'INRA. Rapport du groupe de travail.
- G15** INRA, 2007 (collectif). CAP-Environnement (Concertation en Amont des Programmes sur l'environnement). Rapport du groupe de travail.

Rapports de projets scientifiques

- S1** **Malézieux E.**, 1994. Génétique ananas. Période 1989-1994. Résumé du rapport final. Contrat TS-2A-0196 (INCO). Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 11 p. ill., réf., tabl.
- S2** **Malézieux E.**, 1994. Génétique ananas : rapport final de la période 1989-1994. Contrat n°

TS-2A-0196 (INCO). Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 96 p. ill., réf., tabl.

- S3** Baron C., Bonhomme R., Cattan P., Chopart J.L., Clopes A., Foucher J.F., **Malézieux E.**, Maraun F., Marion D., Martiné J.F., Puard M., De Raïssac M., Siband P.L., Voltz M., 1994. Compte-rendu ATP/CIRAD fin de 3e année : modèles de croissance et développement des cultures annuelles. Méthodes d'évaluation des solutions disponibles et application. Rapport d'avancement décembre 1994. Montpellier, France, CIRAD-CA, [98] p, Notes bibliogr.
- S4** **Malézieux E.**, 1996. La génétique de l'ananas. In : CTA., Deuxième programme science et technique au service du développement. Sous-programme : agriculture tropicale et subtropicale. Projets de recherche 1987-1991. Vol.3 : résumés des rapports finals. Wageningen, Pays-Bas, CTA, p. 7-12.

Documents à diffusion restreinte

Encadrement et animation scientifique, expertise et rapports techniques.

- R1** **Malézieux E.**, Dole B., 1987. Rapport d'essais herbicides sur ananas. s.l., France, CIBA-GEIGY, 9 p.
- R2** **Malézieux E.**, 1987. Cahier des charges pour un logiciel de gestion technique d'une plantation d'ananas. s.l., France, s.n., 27 p.
- R3** **Malézieux E.**, Picasso C., 1989. Etude de faisabilité. Projet de plantation d'ananas en Côte d'Ivoire (plantations Blondey). Octobre 1989. Africa project development facility. s.l., Etats-Unis, World Bank (APDF), 77 p.
- R4** **Malézieux E.**, 1989. Technical report of Nigeria Farm LTD. Port Harcourt, May 1989. s.l., Nigéria, s.n.,.
- R5** **Malézieux E.**, 1989. Etude de la production ivoirienne d'ananas frais. Aspects agronomiques et structure de la production. Mars-avril 1989. s.l., France, SODETEG, 35 p. + annexes.
- R6** **Malézieux E.**, 1990. Test de l'herbicide GALLANT. s.l., France, s.n., . Rapport d'expérimentation.
- R7** **Malézieux E.**, 1990. Etude de faisabilité. Projet de plantation d'ananas en Côte d'Ivoire. Plantation DAM. s.l., Etats-Unis, Commonwealth Development Corporation (CDC).
- R8** **Malézieux E.**, 1991. Influence d'une irrigation localisée et d'une couverture du sol par mulch plastique sur la croissance et le rendement de l'ananas en Basse Côte d'Ivoire. s.l., Côte d'Ivoire, IRFA, 9 p., document interne IRFA. Rapport d'expérimentation.
- R9** **Malézieux E.**, 1991. Influence de la période de calage de la saison sèche par rapport au cycle de culture sur la croissance et le rendement de l'ananas en Basse Côte d'Ivoire. s.l., Côte d'Ivoire, IRFA, 4p.
- R10** **Malézieux E.**, 1991. Influence d'une irrigation localisée sur la croissance et le rendement de l'ananas en Côte d'Ivoire. Test PORTUBE. s.l., Côte d'Ivoire, IRFA, 8 p., document interne

IRFA. Rapport d'expérimentation.

- R11** **Malézieux E.**, 1991. Influence d'une irrigation localisée et d'apports supplémentaires de potasse après TIF sur la croissance et le rendement de l'ananas en Basse Côte d'Ivoire. s.l., Côte d'Ivoire, IRFA, 3 p., document interne IRFA. Rapport d'expérimentation.
- R12** **Malézieux E.**, Dole B., 1991. Etude de faisabilité. Projet de construction d'un centre de conditionnement d'ananas destinés à l'exportation pour une coopérative de petits planteurs. s.l., Ghana, APDF, 29 p. + annexes.
- R13** **Malézieux E.**, 1991. Expert's report of Combined Farmers LTD, July 1991. s.l., Ghana, APDF, 17 p. + annexes.
- R14** **Malézieux E.**, 1993. Compte rendu de mission en Thaïlande du 1er au 4 décembre 1993. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 11 p.
- R15** **Malézieux E.**, 1993. Rapport de mission au Vietnam du 12 novembre au 1er décembre 1993. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 60 p.
- R16** **Malézieux E.**, Sarah J.L., 1994. Report on consultancy mission. Agricultural diversification project : Ghana 11-20 october 1994. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 20 p.
- R17** **Malézieux E.**, 1994. Rapport d'expertise technique des plantations DAM. s.l., Côte d'Ivoire, s.n., 22 p. + annexes.
- R18** **Malézieux E.**, Rey J.Y., 1994. L'état des recherches sur ananas au Cameroun : bilan au 30 avril 1994. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 16 p.
- R19** **Malézieux E.**, Rey J.Y., 1994. Rapport de mission au Cameroun du 11 au 16 avril 1994. La relance de la production d'ananas au Cameroun : freins d'ordre technique et perspectives. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 17p.
- R20** **Malézieux E.**, Ollitrault P., Duval M.F., Coppens G., 1994. Compte-rendu de mission. Brésil du 20 novembre au 01 décembre 1994. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 31 p.
- R21** **Malézieux E.**, Ollitrault P., 1994. Mission Antilles du 14 au 24 juin 1994. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 31 p.
- R22** Dixie G., **Malézieux E.**, 1995. A technical and marketing appraisal of Fruitex industries Benin. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 35 p.
- R23** **Malézieux E.**, Marchal J., 1995. Diagnostic technique des plantations d'ananas de la SCB en Côte d'Ivoire. Mission effectuée du 15 au 19 janvier 1995. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 17 p.
- R24** **Malézieux E.**, 1995. A technical diagnosis survey of John Laurence Farm. s.l., Ghana, APDF, .
- R25** **Malézieux E.**, Pinon A., 1995. Rapport de mission en Bolivie du 22 octobre au 4 novembre 1995. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 33 p.

- R26** **Malézieux E.**, 1996. Compte rendu de mission en Martinique et en Guadeloupe du 6 au 15 juin 1996 : 1ère partie : Martinique (du 6 au 12 juin). Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 19p.
- R27** **Malézieux E.**, 1996. Compte rendu de mission à la Réunion du 18 au 28 mars 1996. Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 31 p.
- R28** **Malézieux E.**, 1996. Compte-rendu de mission en Côte d'Ivoire et au Ghana du 15 au 26 janvier 1996.
Montpellier, France, CIRAD-FLHOR, 6 p.
- R29** De Bon H., **Malézieux E.**, 1996. Compte-rendu de mission en Martinique et Guadeloupe du 6 au 15 juin 1996. 2e partie : Guadeloupe (12 au 15 juin). Montpellier, France, CIRAD-FLHOR.
- R30** **Malézieux E.**, 1997. Compte-rendu synthétique de mission, Île de la Réunion du 20.10 au 30.10.97. Montpellier, France, CIRAD, 5p.
- R31** **Malézieux E.**, 1997. Compte-rendu de mission aux Antilles du 10 juin au 13 juin 1997 (Martinique), du 13 juin au 19 juin 1997 (Guadeloupe). Montpellier, France, CIRAD, 32 p.
- R32** **Malézieux E.**, 20/10/97, Animation scientifique dans le domaine d'AGER et suivi thèse de F. Normand.
- R33** **Malézieux E.**, 01/02/99, Appui scientifique et technique externe (Guadeloupe)
Evaluation de l'unité APC INRA Guadeloupe, encadrement thèse d'A.Jullien
- R34** **Malézieux E.**, 20/06/01, Appui aux chercheurs cirad (Guadeloupe, Martinique)
Elaboration d'actions de recherche programmées dans le cadre de l'UMR SYSTEM
- R35** **Malézieux E.**, 18/03/02, Appui aux chercheurs cirad (Guadeloupe, Martinique)
Elaboration d'actions de recherche programmées dans le cadre de l'UMR SYSTEM, encadrement thèse de P.Tixier.
- R36** **Malézieux E.**, 28/05/02, **Vanuatu, appui aux chercheurs cirad**, projet ATP Seq C, encadrement thèse de N.Lamanda.
- R37** **Malézieux E.**, Novembre 2003, **Vanuatu, appui aux chercheurs cirad**, encadrement thèse de N. Lamanda
- R38** Dugué P., **Malézieux E.**, Novembre 2004, **Guinée**. Projet FSP 2003-015. Pérennisation des dispositifs de recherche nationaux dans les secteurs de l'agriculture et de la pêche en Guinée.